



**Rafael Lourenço Cardoso**

Licenciado em Ciências da  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

## **Cálculo automático para projecto de linha aérea até 30 kV**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Francisco Alexandre Ganho da Silva Reis, Prof. Convidado, FCT-UNL

Coorientador: João Francisco Alves Martins, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Fino

Arguentes: Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves

Vogais: Doutor Francisco Alexandre Ganho da Silva Reis



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro de 2016**



### **Cálculo automático para projecto de linhas aéreas até 30 kV**

Copyright © Rafael Lourenço Cardoso, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*À Catarina, por tudo.*



# Agradecimentos

A realização da presente dissertação é o culminar do percurso académico que só foi possível graças ao contributo de várias pessoas, às quais pretendo expressar o meu mais profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, quero agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologias que me acolheu ao longo destes 5 anos, por ter sido uma segunda casa que me aproximou do conhecimento e das pessoas fantásticas que colocou no meu caminho.

Agradeço ao Professor Francisco Ganho Reis, por ter aceite o desafio que lhe propus, pela disponibilidade e orientação ao longo da realização deste trabalho.

Ao Eng. Nuno Enes pela disponibilidade em transmitir experiência e conhecimento no projecto de linhas e pela constante preocupação e apoio que foram cruciais na elaboração do presente documento.

Aos meus amigos e colegas de curso João Pombas, Tiago Duarte e José Gonçalves pelo companheirismo e partilha ao longo destes 5 anos. Agradeço também aos meus amigos Luís Madeira, José Raposo, Mafalda Ribeiro, Gabriel Dias, Rodrigo Ribeiro e Tiago Henriques pelos momentos de descontração e pela partilha que foram importantes para o meu crescimento pessoal e académico.

Aos meus pais e às minhas irmãs pela compreensão da minha ausência durante o período da minha formação. Aos pais, irmã e avós da Catarina pelo apoio incondicional ao longo dos últimos anos.

Em especial à Catarina, por ter sido a principal força motivadora ao longo deste percurso, pelos momentos de partilha, de aprendizagem, de felicidade e de bem-estar que me proporcionou.

A todos expresso o meu mais sincero agradecimento.





## Resumo

---

O objecto da presente dissertação é o desenvolvimento de uma plataforma que calcule os parâmetros necessários ao dimensionamento dos elementos constituintes de uma linha de média tensão, respeitando as exigências do Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão.

Neste processo, devem ser conhecidas as características e as funções que cada elemento possui na linha e deve ser entendido o cálculo eléctrico e mecânico que conduz ao correcto dimensionamento suportado nas normas de segurança existentes.

A experiência e a sensibilidade do projectista são essenciais na optimização do projecto, contudo, o cálculo envolvido neste processo revela-se repetitivo e, feito manualmente, toma boa parte do tempo de elaboração do projecto e pode, ainda, conduzir a erros ou a perdas de rigor.

São apresentadas as metodologias de cálculo para as componentes eléctrica e mecânica da linha e desenvolvida uma ferramenta de cálculo automático para as linhas aéreas de média tensão, baseado na regulamentação em vigor.

Ilustra-se a aplicação da plataforma de cálculo no projecto de uma linha aérea de 30 kV, com condutores de alumínio-aço de 160 mm<sup>2</sup> e com uma extensão próxima de 6 km.

**Palavras-chave:** Linhas aéreas de média tensão; Cálculo automático; Cálculo mecânico.

---



# Abstract

---

This dissertation's main focus is the creation of a platform that performs the calculus of the needed parameters for the design of the line components, respecting the demands made by the *Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão*, the Portuguese safety regulations to electric high voltage lines.

In this process, the features and functions that each element has on the line must be known and the electrical and mechanical calculus that leads to the proper design supported in the existing safety rules.

To optimize the design of overhead lines the experience and sensibility are required to the designer, however, the calculation involved in this process proves to be repetitive and, when analytically made, takes much of the planning time and can, also, lead to mistakes or loss of accuracy.

Mechanical and Electrical calculus methodologies are introduced and an automatic calculus tool to overhead distribution lines is developed, sustained by the applicable regulations.

The calculus platform is tested with a case of study that consists in an overhead distribution powerline, which nominal tension is 30 kV, with aluminum-steel conductors of 160 mm<sup>2</sup> and covers almost 6 km.

**Keywords:** Overhead power lines design; Automatic calculus; Mechanical calculus.

---



# Conteúdo

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XI</b>
<b>CONTEÚDO .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS.....	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>5</b>
<b>2. LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO.....</b>	<b>5</b>
2.1. GENERALIDADES.....	5
2.2. FASES DO PROJECTO.....	6
2.3. CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DA LINHA .....	7
2.3.1. <i>Fundações e Maciços</i> .....	8
2.3.2. <i>Apoios</i> .....	9
2.3.2.1. <i>Características dos Apoios</i> .....	9
2.3.2.2. <i>Classificação dos Apoios</i> .....	10
2.3.2.3. <i>Profundidade de Enterramento dos Apoios</i> .....	11
2.3.2.4. <i>Tipo de Esforços</i> .....	11
2.3.2.5. <i>Comportamento dos Apoios de Betão</i> .....	12
2.3.3. <i>Armações</i> .....	13
2.3.4. <i>Isoladores e Cadeias de Isoladores</i> .....	17
2.3.5. <i>Condutores</i> .....	21
2.3.6. <i>Acessórios</i> .....	22
2.3.6.1. <i>Balizagem Aérea</i> .....	22
2.3.6.2. <i>Sinalização para Avifauna</i> .....	23
2.3.6.3. <i>Redes de Terras</i> .....	25
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>27</b>

<b>3.</b>	<b>CÁLCULO MECÂNICO E ELÉCTRICO .....</b>	<b>27</b>
3.1.	METODOLOGIA DO CÁLCULO .....	28
3.2.	CÁLCULO MECÂNICO.....	29
3.2.1.	<i>Cálculo da Tracção Máxima.....</i>	<i>30</i>
3.2.2.	<i>Estados Atmosféricos .....</i>	<i>30</i>
3.2.3.	<i>Curva Característica de um Cabo Suspenso.....</i>	<i>31</i>
3.2.3.1.	<i>Vão em Patamar.....</i>	<i>32</i>
3.2.3.2.	<i>Vão Desnivelado .....</i>	<i>35</i>
3.2.3.3.	<i>Vão Contínuo.....</i>	<i>38</i>
3.2.4.	<i>Vão Equivalente ou Fictício.....</i>	<i>44</i>
3.2.5.	<i>Acção dos Agentes Externos sobre as Linhas.....</i>	<i>45</i>
3.2.5.1.	<i>Acção da Temperatura .....</i>	<i>46</i>
3.2.5.2.	<i>Acção do Gelo.....</i>	<i>46</i>
3.2.5.3.	<i>Acção do Vento.....</i>	<i>47</i>
3.2.6.	<i>Coeficientes de Sobrecarga.....</i>	<i>49</i>
3.2.7.	<i>Equação de Mudança de Estado .....</i>	<i>52</i>
3.2.8.	<i>Vão Crítico.....</i>	<i>53</i>
3.2.9.	<i>Estado Atmosférico mais Desfavorável.....</i>	<i>54</i>
3.2.10.	<i>Distâncias Mínimas Regulamentares.....</i>	<i>55</i>
3.2.10.1.	<i>Distância dos Condutores ao Solo .....</i>	<i>55</i>
3.2.10.2.	<i>Distância dos Condutores às Árvores.....</i>	<i>55</i>
3.2.10.3.	<i>Distância dos Condutores aos Edifícios.....</i>	<i>56</i>
3.2.10.4.	<i>Distância dos Condutores a Obstáculos Diversos .....</i>	<i>56</i>
3.2.10.5.	<i>Distância entre Condutores .....</i>	<i>57</i>
3.2.10.6.	<i>Distância entre Condutores e Apoios.....</i>	<i>58</i>
3.2.10.7.	<i>Travessias Aéreas .....</i>	<i>58</i>
3.2.11.	<i>Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores em Suspensão.....</i>	<i>59</i>
3.2.12.	<i>Estabilidade dos Apoios.....</i>	<i>60</i>
3.2.12.1.	<i>Apoios de Alinhamento e Ângulo .....</i>	<i>61</i>
3.2.12.2.	<i>Apoios de Derivação.....</i>	<i>63</i>
3.2.12.3.	<i>Apoios de Reforço em Alinhamento.....</i>	<i>64</i>
3.2.12.4.	<i>Apoios de Reforço em Ângulo.....</i>	<i>66</i>
3.2.12.5.	<i>Apoios de Reforço em Derivação .....</i>	<i>67</i>
3.2.12.6.	<i>Apoios de Fim de Linha .....</i>	<i>69</i>
3.2.12.7.	<i>Deslocar Forças para o Topo do Poste.....</i>	<i>70</i>
3.2.12.8.	<i>Seleccção do Apoio .....</i>	<i>71</i>
3.3.	CÁLCULO ELÉCTRICO.....	73
3.3.1.	<i>Tensão de Transporte .....</i>	<i>73</i>
3.3.2.	<i>Constantes Físicas .....</i>	<i>73</i>
3.3.2.1.	<i>Resistência Eléctrica .....</i>	<i>74</i>
3.3.2.2.	<i>Coeficiente de Auto-indução.....</i>	<i>74</i>
3.3.2.3.	<i>Capacidade .....</i>	<i>75</i>

3.3.2.4.	<i>Condutância</i> .....	75
3.3.3.	<i>Características Eléctricas</i> .....	76
3.3.3.1.	<i>Reactância</i> .....	76
3.3.3.2.	<i>Susceptância</i> .....	77
3.3.3.3.	<i>Impedância</i> .....	77
3.3.3.4.	<i>Admitância</i> .....	77
3.3.4.	<i>Corrente de Serviço</i> .....	77
3.3.5.	<i>Perdas de Energia</i> .....	78
3.3.6.	<i>Quedas de Tensão</i> .....	78
3.3.7.	<i>Intensidade máxima admissível</i> .....	79
<b>CAPÍTULO 4.</b>		<b>81</b>
<b>4.</b>	<b>AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO</b> .....	<b>81</b>
4.1.	GENERALIDADES.....	81
4.2.	DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DE CÁLCULO .....	82
4.2.1.	MOTIVAÇÃO .....	82
4.2.2.	METODOLOGIAS .....	82
4.2.3.	PRINCIPAIS CÁLCULOS PREVISTOS NA PLATAFORMA.....	83
4.2.4.	APRESENTAÇÃO DA PLATAFORMA .....	85
4.3.	CASO DE ESTUDO .....	89
4.3.1.	<i>Exemplo de utilização da plataforma</i> .....	92
<b>CAPÍTULO 5.</b>		<b>95</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO</b> .....	<b>95</b>
5.1.	CONCLUSÕES.....	95
5.2.	TRABALHO FUTURO .....	96
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>99</b>
<b>ANEXOS</b> .....		<b>102</b>
	ANEXO I – MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA.....	102
	ANEXO II – PERFIL .....	103
	ANEXO III -TABELA COM APOIOS ESCOLHIDOS PARA O PERFIL.....	104
	ANEXO IV -TABELA COM TENSÕES DE MONTAGEM .....	105

# Índice de Figuras

FIGURA 2.3-1- CLASSIFICAÇÃO DOS APOIOS DE ACORDO COM A SUA FUNÇÃO: (A) -APOIO DE ALINHAMENTO; (B)- APOIO DE ÂNGULO; (C)- APOIO DE REFORÇO DE ALINHAMENTO; (D)- APOIO DE FIM DE LINHA; (E)- APOIO DE DERIVAÇÃO EM ALINHAMENTO; (F)- APOIO DE DERIVAÇÃO EM ÂNGULO.(ROCHA, 2014) .....	11
FIGURA 2.3-2 - SENTIDO DE ACTUAÇÃO DAS FORÇAS NO APOIO QUANDO ESTE SE ENCONTRA ORIENTADO PARALELAMENTE À LINHA E TRANSVERSALMENTE À LINHA, RESPECTIVAMENTE. LINHA PRINCIPAL SEGUNDO O EIXO DAS ABCISSAS(N. A. L. V. GONÇALVES, 2004).....	12
FIGURA 2.3-3 - GAL. ....	15
FIGURA 2.3-4 – GAN. ....	15
FIGURA 2.3-5 - TAN.....	16
FIGURA 2.3-6 - VAN. ....	16
FIGURA 2.3-7 - HRFSC .....	16
FIGURA 2.3-8 - PAL.....	17
FIGURA 2.3-9 - PAN.....	17
FIGURA 2.3-10 - TAL.....	17
FIGURA 2.3-11-TIPOS DE ISOLADORES: (A) ISOLADORES RÍGIDOS; (B) ISOLADOR PARA ACOPLAMENTO EM CADEIA.(GALVÃO, 2010).....	19
FIGURA 2.3-12 - BALIZAGEM DIURNA DE LINHAS AÉREAS.....	22
FIGURA 2.3-13 - BALIZAGEM NOCTURNA DE LINHAS AÉREAS. (CUNHA, 2008) .....	23
FIGURA 2.3-14 -SALVA-PÁSSAROS COM ESPIRAL SIMPLES (FIGURA À ESQUERDA) E COM ESPIRAL DUPLA (FIGURA À DIREITA). (EDP DISTRIBUIÇÃO, 2013).....	24
FIGURA 2.3-15 - PROTECÇÃO DE FASE NUM APOIO DE AMARRAÇÃO POR MEIO DE PROTECTORES DE PINÇA DE AMARRAÇÃO EM CONJUNTO COM COBERTURA FLEXÍVEL DE PROTECÇÃO DE CONDUTOR. (EDP DISTRIBUIÇÃO, 2013) .....	24
FIGURA 2.3-16 - LIGAÇÃO DO APOIO AOS ELÉCTRODOS DE TERRA, NA FIGURA À ESQUERDA. LIGAÇÃO DA ARMAÇÃO À TERRA, NA FIGURA À DIREITA (A VERMELHO). (EDP DISTRIBUIÇÃO 2010) .....	25
FIGURA 3.2-1 - CURVA DA CATENÁRIA PARA VÃO EM PATAMAR.(LEONARD L GRIGSBY, 2006) .....	33
FIGURA 3.2-2- RELAÇÃO ENTRE A CURVA DESCRITA PELA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA COM A EQUAÇÃO DA CATENÁRIA. ....	34
FIGURA 3.2-3- VÃO DESNIVELADO.(LEONARD L GRIGSBY, 2006) .....	36
FIGURA 3.2-4 – CANTÃO EM PATAMAR COM APOIO CENTRAL EM SUSPENSÃO.(PEDREIRA, 2013) .....	39
FIGURA 3.2-5 - APOIOS DE FIM DE LINHA. AMPLIAÇÃO DA FIGURA PRINCIPAL. ....	39
FIGURA 3.2-6 - APOIOS INTERMÉDIO. AMPLIAÇÃO DA FIGURA PRINCIPAL. ....	39
FIGURA 3.2-7 CANTÃO EM PATAMAR COM VÃOS DE DIFERENTES COMPRIMENTOS.(PEDREIRA, 2013) .....	40
FIGURA 3.2-8 - CANTÃO EM DECLIVE COM VÃOS DE DIFERENTES COMPRIMENTOS.(PEDREIRA, 2013) .....	41
FIGURA 3.2-9 - APOIOS MAIS BAIXO. AMPLIAÇÃO DA FIGURA PRINCIPAL. ....	42
FIGURA 3.2-9 - APOIOS CENTRAL. AMPLIAÇÃO DA FIGURA PRINCIPAL. ....	43
FIGURA 3.2-10- SITUAÇÃO DE ENFORCAMENTO DO APOIO B.(LABEGALINI ET AL., 1992) .....	44
FIGURA 3.2-9 - FORÇAS EXERCIDAS SOBRE UM CONDUTOR.(PEDREIRA, 2013) .....	50
FIGURA 3.2-12 - ÁRVORE DE DECISÃO DO ESTADO ATMOSFÉRICO MAIS DESFAVORÁVEL.....	54



FIGURA 3.2-11 - CONJUNTO DE FORÇAS EXERCIDAS SOBRE UMA CADEIA DE SUSPENSÃO, EM EQUILÍBRIO, SUBMETIDA À ACÇÃO DO VENTO.(CHECA, 1988) .....	59
FIGURA 3.2-12 - REDUÇÃO DOS ESFORÇOS SOBRE O APOIO, SEGUNDO O EIXO X, À ALTURA DA PRIMEIRA FURAÇÃO. (N. A. L. V. GONÇALVES, 2004) .....	71
FIGURA 4.2.4-1 - LAYOUT DA FOLHA "MAIN", A FOLHA CENTRAL DESTA FERRAMENTA DE CÁLCULO. ....	86
FIGURA 4.2.4-2 - MÉTODO NEWTON-RAPHSON NA REGULAÇÃO DOS CONDUTORES PARA UMA TEMPERATURA DE 0°C. ....	88
FIGURA 4.3-1 - EXEMPLO DE INTRODUÇÃO DE DADOS NA PLATAFORMA DE CÁLCULO. ....	93
FIGURA 4.3-2 -DADOS DEVOLVIDOS PELA PLATAFORMA PARA O EXEMPLO EM ESTUDO.....	94



# Lista de Tabelas

TABELA 2.3-1 - NÍVEL DE ISOLAMENTO DE ACORDO COM O NÍVEL DE POLUIÇÃO.(RAMIRES, 2008) .....	19
TABELA 3.2-1 – VALORES DE TEMPERATURA PARA OS DIFERENTES ESTADOS. ....	31
TABELA 3.2-2 - PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO EM FUNÇÃO DA ALTURA AO SOLO. ....	48
TABELA 3.2-3 - VALOR PARA O COEFICIENTE DE FORMA PARA CONDUTORES, CABOS E ISOLADORES.....	49
TABELA 3.2-4 -APOIO DE ÂNGULO - SÍNTESE DE SOLICITAÇÕES APLICADAS DE ACORDO COM AS DUAS HIPÓTESES, CONSIDERADAS NÃO SIMULTANEAMENTE. ART. 56.º E 57.º DO RSLEAT. ....	62
TABELA 3.2-5 -APOIO DE DERIVAÇÃO- SÍNTESE DE SOLICITAÇÕES APLICADAS DE ACORDO COM AS DUAS HIPÓTESES, CONSIDERADAS NÃO SIMULTANEAMENTE. ART. 58.º DO RSLEAT.....	64
TABELA 3.2-6 -APOIO DE REFORÇO EM ALINHAMENTO - SÍNTESE DE SOLICITAÇÕES APLICADAS DE ACORDO COM AS DUAS HIPÓTESES, CONSIDERADAS NÃO SIMULTANEAMENTE. ART. 59.º DO RSLEAT.....	65
TABELA 3.2-7 -APOIO DE REFORÇO EM ÂNGULO - SÍNTESE DE SOLICITAÇÕES APLICADAS DE ACORDO COM AS DUAS HIPÓTESES, CONSIDERADAS NÃO SIMULTANEAMENTE. ART. 60.º DO RSLEAT.....	67
TABELA 3.2-8 -APOIO DE REFORÇO EM DERIVAÇÃO- SÍNTESE DE SOLICITAÇÕES APLICADAS DE ACORDO COM AS DUAS HIPÓTESES, CONSIDERADAS NÃO SIMULTANEAMENTE. ART. 61.º DO RSLEAT.....	68
TABELA 3.2-9 -APOIO DE FIM DE LINHA - SÍNTESE DE SOLICITAÇÕES APLICADAS DE ACORDO COM AS DUAS HIPÓTESES, CONSIDERADAS NÃO SIMULTANEAMENTE. ART. 62.º DO RSLEAT.....	70
TABELA 3.3-1 - VALORES DAS CONSTANTES PARA CADA TIPO DE MATERIAL DE CONDUTOR: $K_1$ E $K_2$ . ....	79
TABELA 4.3-1 - DADOS A INTRODUIR NA PLATAFORMA DE CÁLCULO PARA O APOIO Nº 7. ....	92





# Capítulo 1

## 1. INTRODUÇÃO

### *1.1. Enquadramento e Objectivos*

No contexto actual, a energia eléctrica é considerada um bem essencial devido à manifesta dependência que gera na sociedade moderna, desde o uso industrial ao uso doméstico.

Sendo este um bem tão valioso, o seu transporte e distribuição carecem de um cuidado acrescido que implica a existência de um planeamento criterioso que respeite os níveis de qualidade e segurança exigidos. Em Portugal, os principais níveis de tensão das linhas de transporte são: 400 kV, 220 kV e 150 kV. Na distribuição, os níveis de tensão normalizados são: 60 kV, 30 kV e 15 kV.

Neste documento, pretende-se analisar o projecto de linhas aéreas de alta tensão até 30 kV. Esta opção deve-se à dimensão que este tipo de linhas tem na rede eléctrica

nacional. Em 2014, as linhas aéreas de média tensão estendiam-se por mais de 58 mil quilómetros face aos quase 9 mil quilómetros que compunham a rede de transporte. Esta diferença demonstra a necessidade de criar ferramentas que facilitem e agilizem o projecto deste tipo de linhas.

O foco da presente dissertação é a concepção de uma ferramenta de cálculo que auxilie o projecto de linhas aéreas de média tensão, nomeadamente o cálculo mecânico por ser este que tem maior importância para o projectista. Para atingir este fim, serão introduzidos os fundamentos e as metodologias presentes no projecto. Faz-se, então, uma exposição do processo de realização do projecto e uma descrição dos vários elementos existentes numa linha eléctrica deste tipo. Naturalmente, será estudado e exposto o cálculo que envolve o dimensionamento destas linhas.

A plataforma de cálculo a desenvolver deverá permitir determinar os parâmetros necessários à elaboração de um projecto de linhas aéreas de alta tensão, de acordo com o Regulamento de Segurança das Linhas Eléctricas de Alta Tensão, doravante RSLEAT (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992).

Esta plataforma deverá ainda considerar no seu cálculo a normalização e especificações da EDP Distribuição, enquanto operador da rede de distribuição em Portugal e restantes entidades oficiais que se pronunciam sobre estas infra-estruturas eléctricas, como por exemplo: o Ministério da Economia, as Infra-estruturas de Portugal e o Instituto da Conservação da Natureza.

## ***1.2. Estrutura da Dissertação***

Em primeiro lugar, no capítulo 2, é feita uma breve descrição das diferentes fases do projecto e das situações que requerem especial cuidado. Seguidamente, faz-se a caracterização e identificação de todos os elementos constituintes da linha e das características que estes elementos possuem para cumprirem a sua função na linha.

No capítulo 3, é introduzido o cálculo mecânico e eléctrico dos parâmetros que relevam na elaboração de um projecto e, para tal, são explicados os fenómenos que suportam o referido cálculo para que se compreenda a sua origem. Neste capítulo, são, também, referenciadas as distâncias mínimas regulamentares que devem ser mantidas aos obstáculos da linha.

No capítulo 4, é apresentada a plataforma de cálculo desenvolvida e as suas funcionalidades. Nesta secção apresenta-se, ainda, o projecto de licenciamento (com memória descritiva e peças desenhadas), elaborado para uma linha aérea com condutor alumino-aço de  $160 \text{ mm}^2$  com cerca de 6 km de comprimento e respectiva construção da linha (regulação dos condutores), que resultará da utilização da plataforma desenvolvida.

Por último, no capítulo 5, será feita uma reflexão sobre o trabalho produzido e apresentadas sugestões que se propõem para trabalho futuro.







## Capítulo 2

# 2. LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO

### *2.1. Generalidades*

Neste capítulo, pretende elucidar-se sobre os temas e conceitos que irão ser necessários à realização da presente dissertação.

Primeiramente, faz-se uma introdução do processo que envolve o projecto de linhas aéreas de alta tensão. Seguidamente, são apresentados os elementos que constituem a linha e as características que lhes são exigidas para cumprirem a sua função na linha.

Uma linha representa um circuito eléctrico que comporta elementos passivos e activos cuja finalidade é garantir o transporte e distribuição de energia eléctrica. Os condutores, enquanto elementos activos, asseguram a condução da

energia. Os restantes elementos garantem o suporte da linha que, nas linhas aéreas, são compostos pelo apoio, pela armação e pelos isoladores ou cadeias de isoladores.

A crescente utilização de linhas subterrâneas em zonas urbanas deve-se, sobretudo, ao menor impacto visual e à maior segurança de pessoas e bens. No entanto, não serão aplicadas em detrimento das linhas aéreas por terem um custo de instalação muito superior (entre 3 a 5 vezes maior).

Na maioria das vezes, a construção de linhas aéreas de média tensão tem como origem o pedido de ligação à rede por parte de novos clientes. Poderão também ocorrer modificações no traçado de linhas existentes ou ainda a ligação a novos postos de transformação.

## ***2.2. Fases do Projecto***

O projecto de linhas aéreas de alta tensão pode ser visto como um conjunto de etapas executadas sequencialmente. Contudo, a qualquer altura poderá ser necessária a repetição de uma etapa anterior por forma a otimizar o projecto.

Inicialmente, é feita a escolha do traçado da linha, em planta e à escala adequada, que deverá ser tão rectilíneo quanto possível, respeitando as condicionantes associadas.

O traçado deve desenvolver-se, sobretudo, através de meias encostas, vales e pontos acessíveis, atendendo, portanto, às curvas de nível. De entre os condicionamentos a respeitar, destacam-se: a existência de percursos de água, a geografia do terreno, travessias (entre as quais as infra-estruturas viárias), linhas de telecomunicações, o respeito pelo património cultural e estético da paisagem, entre outros. Assim, as circunstâncias mencionadas conflituam com a escolha de um traçado rectilíneo ideal, verificando-se um compromisso de cedência entre o comprimento da linha e estas condicionantes.

Seguidamente, o topógrafo fará o levantamento topográfico do terreno que consistirá na validação do traçado escolhido e na identificação de condicionantes não identificadas. Desta fase, resulta o perfil longitudinal do terreno e a planta parcelar devidamente sinalizado com as existências acima do solo, num raio de

vinete metros, que sejam de carácter relevante para a elaboração do projecto. Estão também identificadas as divisões das propriedades atravessadas, bem como os respectivos proprietários.

Deverá ser feito o cálculo eléctrico para determinar a secção do condutor, a tensão de serviço e a potência de curto-circuito. Salienta-se que estes parâmetros são, normalmente, definidos pelo operador de rede por possuir o conhecimento da integração desta linha na rede existente.

O cálculo eléctrico determina, também, o grau de isolamento, isto é, o comprimento mínimo da linha de fuga dos isoladores e as constantes físicas/características eléctricas da linha, tais como: a resistência, o coeficiente de auto-indução, a capacidade, a impedância, as quedas de tensão, as perdas de energia, entre outros.

No perfil, é estabelecida uma distância mínima ao solo e aos condicionaismos assinalados que se deve respeitar. Posteriormente, são distribuídos os apoios no perfil do terreno, encetando pelos apoios cuja posição está determinada, como é o caso dos apoios de início, de ângulo e de fim de linha.

É, ainda, necessário proceder ao dimensionamento dos apoios para que se garanta a estabilidade da linha. Para o efeito, realiza-se o cálculo mecânico que incidirá sobre os esforços a que o apoio está sujeito e que determinará a decisão sobre as características do apoio e da armação a utilizar.

### ***2.3.Caracterização e Identificação dos Elementos da Linha***

A linha é composta por vários elementos que deverão ser dimensionados de modo a suportar as solicitações eléctricas e mecânicas a que estão sujeitos. Importa referir que todos componentes obedecem às condições especificadas no RSLEAT. Nas subsecções seguintes serão analisados os elementos constituintes de uma linha aérea de média tensão.

### *2.3.1. Fundações e Maciços*

Os maciços de fundação são feitos de betão ciclópico, que consiste na incorporação de pedras de granulometria variável e cujo comprimento varia entre 10 e 40cm. Representam uma parte importante no projecto de linhas aéreas pois constituem cerca de 30% do preço final do projecto (Madureira, 2009).

Estes elementos têm a responsabilidade de conduzir para o solo os esforços resultantes do seu próprio peso e de esforços externos que resultam da força do vento e do peso dos apoios e restantes elementos da linha ou de outra força que lhe seja transmitida pelo apoio. Desta forma, deve ser dimensionado para que, quando sujeito à solicitação máxima, o apoio mantenha a sua verticalidade.

Como critério de decisão inicial, deverão ser considerados vários aspectos, para averiguar sobre a necessidade da colocação de um maciço de fundação que são:

- Natureza do terreno;
- Responsabilidade da linha na rede;
- A função do apoio;
- Os esforços envolvidos;
- A altura do apoio.(D.G.E., 1986)

Como o maciço de betão apresenta grande resistência aos esforços, acaba por ser a compressibilidade do terreno de implantação o factor que mais condiciona a sua estabilidade. A compressibilidade do terreno varia de acordo com o tipo de terreno e o seu valor aumenta com a profundidade.

O dimensionamento das fundações é feito utilizando o método de Sulzberger (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)<sup>1</sup>. Não será aqui objecto de estudo pois, normalmente, não compete ao projectista a realização deste cálculo, uma vez que as dimensões do maciço estão padronizadas para cada apoio.

---

<sup>1</sup> Recomendado no art. 74.º, 2º comentário do RSLEAT (Edição DGE).

### 2.3.2. Apoios

Os apoios têm como função o suporte das travessas e de garantir a ligação à terra de todos os elementos passivos.

No princípio da electrificação nacional, os apoios eram todos metálicos que foram, progressivamente, substituídos por apoios de betão à medida que a tecnologia permitiu o fabrico e transporte deste tipo de apoios. No entanto, a Norte do país, a utilização dos metálicos não seguiu a tendência devido à geografia do terreno que limita o acesso.

Recentemente, a EDP Distribuição, num processo de uniformização, está a promover a utilização predominante de apoios de betão pois existe maior disponibilidade de tecnologia que facilita o transporte e manuseamento destes apoios.

A uniformização deste tipo de apoios é feita por serem economicamente mais acessíveis e por ocuparem um menor espaço de implantação, comparativamente com os apoios metálicos. Todavia, os apoios metálicos serão usados em situações de difícil montagem (acessibilidade do terreno) pois podem ser montados por tramos no local, facilitando o transporte.

#### 2.3.2.1. Características dos Apoios

Os postes de betão possuem diversas alturas e medidas de acordo com a função e os esforços a que serão submetidos.

A designação que lhes é atribuída permite conhecer várias das suas propriedades, sendo denominados pela sua altura total, código de utilização, dimensões e as solicitações principal e secundária. Por exemplo, o poste 18-MP02-1000-520 corresponde a:

- 18 metros de altura total;
- Código de utilização “M”;
- Código de dimensões “P02”;
- Solicitação principal de 1000daN;
- Solicitação secundária de 520daN.

Os códigos de utilização representam:

- “B” para postes de Baixa Tensão;
- “M” para postes de Média Tensão;
- “A” para postes de Alta Tensão.

Os códigos de dimensão identificam as dimensões do topo do poste.

De forma a fixar as armações ou outros acessórios, os postes possuem várias furações separadas 12,5 centímetros entre si. Para uma das faces, a furação inicia-se a 5 centímetros do topo e a última furação está aos 2,55 metros. Para a outra face tem-se a primeira furação aos 12,5 centímetros e a última a 2 metros do topo.

#### 2.3.2.2. *Classificação dos Apoios*

Os apoios podem ser classificados de acordo com a função na linha, existem então:

- Apoios de alinhamento: quando se situam num troço rectilíneo.
- Apoios de ângulo: quando situado num ângulo entre dois troços rectilíneos da linha.
- Apoios de derivação: onde se estabelecem uma ou mais derivações.
- Apoios de fim de linha: localizado no final da linha. Sujeito à força de tracção horizontal, pois suporta todos os esforços exercidos pelos condutores de um só lado da linha.
- Apoios de reforço: preparado para ser solicitado à torção, na eventualidade de rotura de um condutor. Pode ser usado em qualquer uma das situações anteriores. De acordo com o art. 63º do RSLEAT, o afastamento entre dois apoios de reforço consecutivos deve ser de quinze vãos.

Nas imagens seguintes, a linha principal está representada sobre o eixo das abcissas.

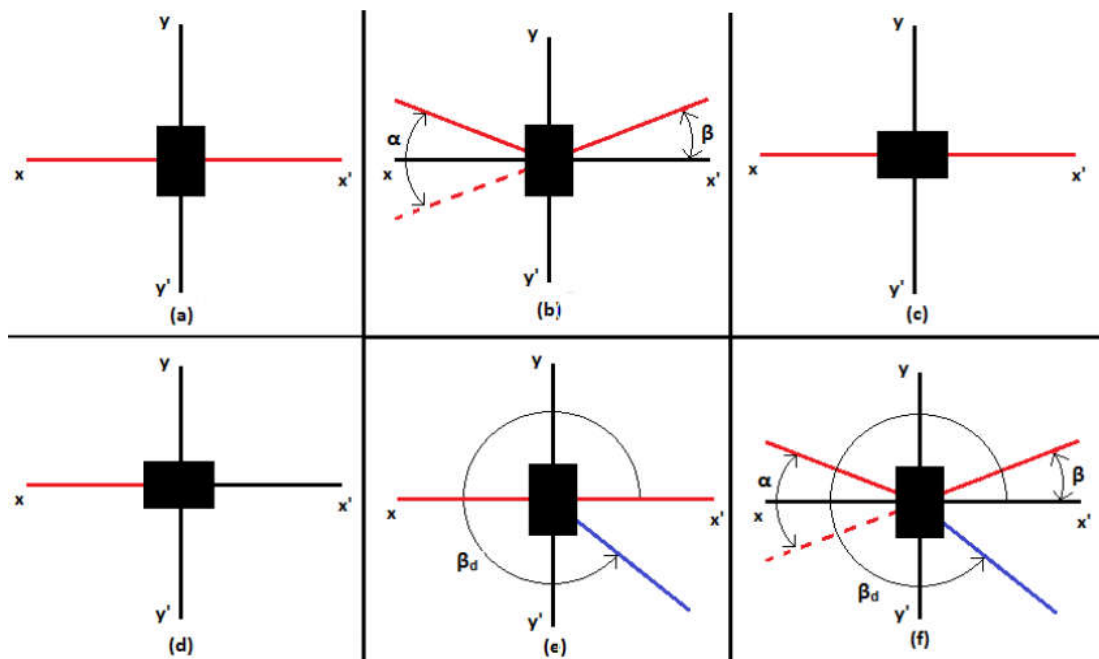


Figura 2.3.1-1- Classificação dos apoios de acordo com a sua função: (a) -Apoio de alinhamento; (b)- Apoio de ângulo; (c)- Apoio de reforço de alinhamento; (d)- Apoio de fim de linha; (e)- Apoio de derivação em alinhamento; (f)- Apoio de derivação em ângulo.(Rocha,

### 2.3.2.3. Profundidade de Enterramento dos Apoios

A profundidade de enterramento dos apoios,  $h_e$ , que corresponde à altura do maciço, é, de acordo com o número 3 do art. 73º do RSLEAT, obtida da seguinte forma:

$$h_e = 0,1 H + 0,5 [m] \quad (2.3-1)$$

A equação (2.3-1) aplica-se a postes cuja altura é menor que 15 metros. Para alturas superiores podem ser consideradas profundidades inferiores às dadas pela equação, desde que não sejam inferiores a 2 metros e que se demonstre a estabilidade do apoio.

Para que se possa fiscalizar/averiguar, de forma expedita, se o enterramento cumpre o supracitado, existe uma marca a 3 metros da base do apoio.

### 2.3.2.4. Tipo de Esforços

Em situações normais, os apoios estão sujeitos a esforços nas três componentes espaciais.

Os esforços verticais resultam do peso dos condutores e restantes elementos da linha.

Os esforços longitudinais resultam de tensões diferentes nos vãos afijos ao apoio ou no caso de existirem condutores de um só lado do apoio.

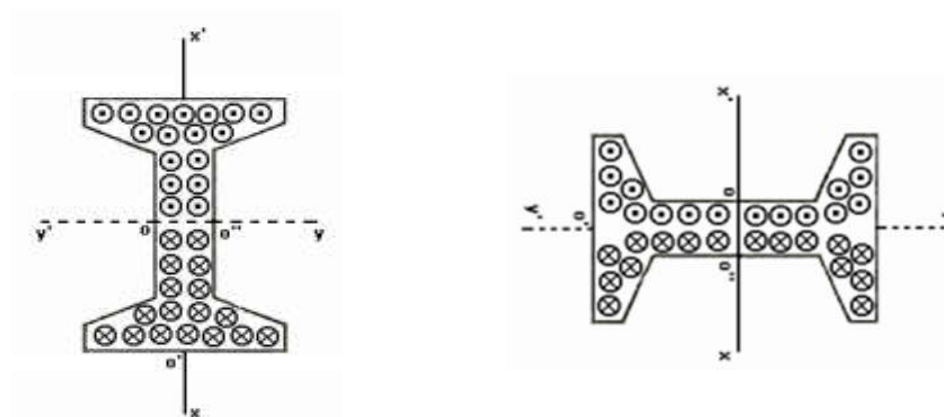
Os esforços transversais devem-se à força do vento sobre os elementos da linha. Podem verificar-se esforços transversais adicionais resultantes das tracções no caso de um apoio de ângulo.

De forma a prevenir situações excepcionais, os apoios devem ser ensaiados de forma a que se conheça a sua robustez quando aplicado um momento de torção. Este tipo de esforço ocorre quando existe ruptura de um condutor que se situe afastado da estrutura do poste, no plano horizontal.

#### 2.3.2.5. Comportamento dos Apoios de Betão

Os apoios de betão apresentam um comportamento distinto consoante a orientação com que são implantados na linha. Esta diferença relaciona-se com o momento de inércia do apoio.

O apoio pode ser colocado, genericamente, em duas principais orientações: paralelo à linha ou transversalmente à linha. Destas orientações resultam duas solicitações distintas no apoio, representadas na Figura 2.3.1-2, respectivamente:



**Figura 2.3.1-2 - Sentido de actuação das forças no apoio quando este se encontra orientado paralelamente à linha e transversalmente à linha, respectivamente. Linha principal segundo o eixo das abcissas(N. A. L. V. Gonçalves, 2004)**



Na Figura 2.3.1-2, é possível reparar que o apoio apresenta maior resistência aos esforços quando colocado paralelamente à linha pois, pela definição de momento de inércia, o produto massa – distância é maior nessa orientação.

Deste fenómeno resulta que a variação força exercida pelo vento, para cada altura de um tipo de apoio, é desprezável segundo a direcção do momento de maior inércia. O mesmo não se verifica para a direcção do momento de menor inércia. O conjunto de equações vectoriais seguinte, referentes ao apoio MP00-400-220, demonstra esta observação:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Segundo a direcção principal} \\ \frac{Fx_p}{400} + \frac{Fy_p}{220} = 1 \\ \text{Segundo a direcção secundária} \\ \left| \begin{array}{l} \rightarrow h = 14 \\ \frac{Fx_s}{192} + \frac{Fy_s}{109} = 1 \\ \rightarrow h = 16 \\ \frac{Fx_s}{147} + \frac{Fy_s}{81} = 1 \\ \rightarrow h = 18 \\ \frac{Fx_s}{91} + \frac{Fy_s}{50} = 1 \end{array} \right| \end{array} \right. \quad (2.3-2)$$

Onde  $Fx_p$  representa a força segundo x disponível segundo a direcção principal,  $Fy_p$  a força segundo y disponível segundo a direcção principal, os restantes representam o mesmo para a direcção secundária.

Analisando as equações vectoriais (2.3-2) verifica-se que, para a direcção secundária, o apoio é tanto mais debilitado pelo vento quanto maior a sua altura.

### 2.3.3. Armações

As armações são estruturas metálicas que suportam os condutores através dos isoladores. A sua principal função é garantir uma distância segura entre os condutores e entre estes e o apoio.

À distância menor que a travessa permite, entre os seus condutores, designa-se por distância de garantia. Naturalmente, quanto mais se prolongarem os condutores para além da travessa, menor será esta distância devido ao aumento da amplitude das oscilações nos condutores provocadas pelo vento ou pela queda de gelo.

Tendo em consideração o nº2 do art. 31.º do RSLEAT, fora das zonas de gelo, a distância entre dois condutores, no eixo vertical, pode ser até dois terços inferior à distância horizontal. Esta assimetria é consequência das oscilações verticais terem como origem, sobretudo, a queda do gelo proveniente dos condutores. Assim, a distância de garantia, no eixo vertical, é 1,5 vezes superior à distância de garantia no eixo horizontal. (*Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia*, 1992)

A armação com maior distância de garantia permitirá um vão maior. Esta relação está patente na equação seguinte:

$$L_{max} = \sqrt{8P \cdot \left[ \left( \frac{D_g - \frac{U}{200}}{0,75 K} \right)^2 - d \right]} \quad [m] \quad (2.3-3)$$

Onde:

$L_{max}$  - Vão máximo admitido pela travessa [m];

$D_g$  - Distância de garantia de uma dada armação [m];

$U$  - Tensão da linha [kV];

$d$  - Comprimento das cadeiras de isoladores [m];

$K$  - Constante que depende da natureza do condutor:

- 0.6, para condutores de cobre e alumínio-aço.

- 0.7, para condutores de liga de alumínio.

O cálculo da distância de garantia deve ser feito para cada armação pois, cada uma delas dispõe os condutores em configurações distintas no espaço.

A designação das armações é feita de acordo com o tipo de disposição dos condutores, a sua função na linha e os esforços que suportam. Desta forma, existem as seguintes armações normalizadas:

Esteira horizontal:	Esteira Vertical:	Triângulo:	Galhardete:	Pórtico:
▪ HAL-A2S;	▪ VAL;	▪ TAL;	▪ GAL;	▪ PAL;
▪ HRSFSC3;	▪ VAN;	▪ TAN;	▪ GAN.	▪ PAN;
▪ HRFSC;	▪ VRF;	▪ TRF;		▪ PRF;
▪ HAN;	▪ VFL.	▪ TFL.		▪ PFL.
▪ HRF;				
▪ HFL				
▪ HSC;				
▪ HDR.				

Todas as armações terminadas em “AL” são utilizadas em apoios de alinhamento da mesma forma que as terminadas em “AN” são para apoios de ângulo. Nos alinhamentos são utilizadas cadeias em suspensão enquanto que nas outras situações as cadeias de isoladores são amarradas à travessa.

Na DMA-C67-620N de 2005, a EDP Distribuição procurou associar várias designações de armações que, apesar de serem aplicadas em situações distintas, utilizam a mesma ferragem.(EDP, 2005) Assim, para a esteira vertical, para o triângulo e para o pórtico, as armações terminadas em “RF” (ReForço) e “FL” (Fim de Linha) foram remetidas para as terminadas em “AN”. No caso da esteira horizontal, as designações HAN, HRF, HSC e HDR(Derivação) foram substituídas pela HRFSC. Neste documento, considera-se relevante que haja distinção, do ponto de vista de projecto e execução, pelo que não se adopta a simplificação.

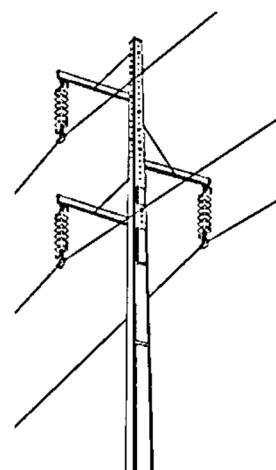


Figura 2.3.1-3 - GAL.

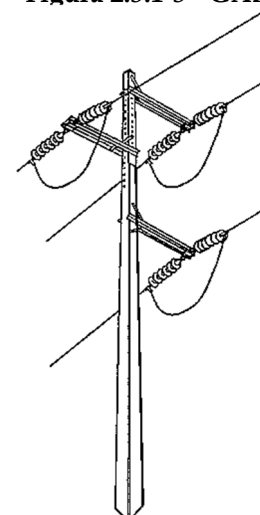


Figura 2.3.1-4 - GAN.

Para situações de alinhamento, a EDP Distribuição recomenda o uso da GAL por permitir vãos maiores. Antigamente optava-se pela TAL pois, nesta disposição, como os condutores mais baixos se encontram a um metro do topo do poste, permite a utilização de apoios menores nalgumas situações.

Quando o apoio estiver em ângulo, as armações aconselhadas a utilizar são a TAN e a GAN, preferencialmente esta última por permitir vãos maiores. Não obstante, em situações de ângulo muito apertado, a VAN permite a passagem dos arcos (troços de condutor que garantem a continuidade do circuito eléctrico nas amarrações) com menor perigo de contacto com o apoio.

É indicado o uso da HRF, TRF e da VRF em situações de reforço. A esteira vertical tem particularidade de não solicitar o apoio à torção pois a distância dos condutores ao apoio, no eixo horizontal, é nula.

Quando há derivações, deve ser utilizada a esteira horizontal HDR. Esta armação permite que a continuidade eléctrica seja feita, através dos arcos, com menor perigosidade entre condutores e condutor-apoio. Há, porém, situações em que outra esteira é mais adequada, como em apoios cuja linha principal está disposta em esteira vertical, em que a derivação mais segura é através da armação do mesmo tipo.

Em apoios com seccionadores, deverá ser utilizada a armação HSC por simplificar as ligações ao seccionador, não necessitando de isoladores adicionais para garantir a distância ao poste e/ou aos condutores.

As armações em pórtico, possuem uma distância de garantia maior e, por esta razão, são utilizados quando houver necessidade de projectar grandes vãos. De salientar que este tipo de armações apresenta um comportamento

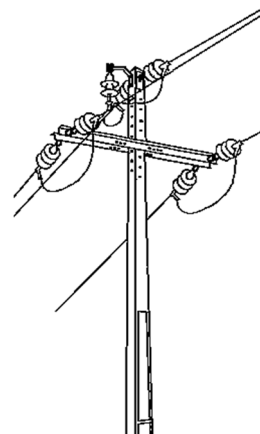


Figura 2.3.1-5 - TAN.

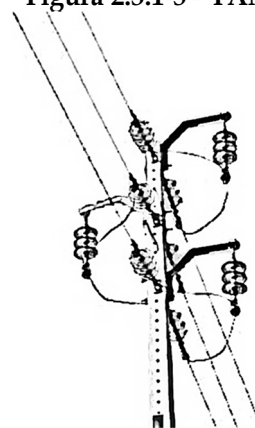


Figura 2.3.1-6 - VAN.

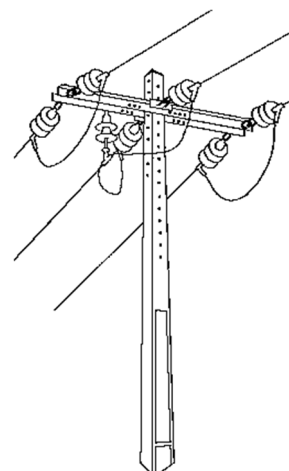


Figura 2.3.1-7 - HRFSC

robusto e, no caso da PRF e PFL, quando solicitados à torção são altamente resistentes, devido à inércia de toda a estrutura, podendo desprezar-se o efeito deste esforço. (EDP, 2005)

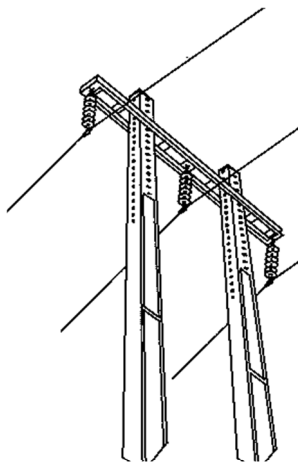


Figura 2.3.1-8 - PAL.

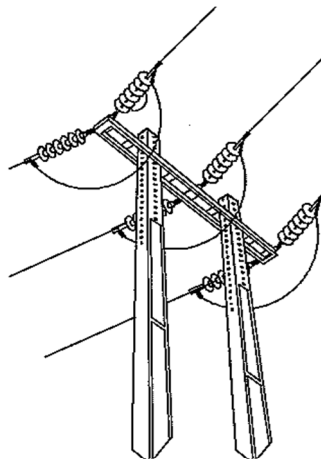


Figura 2.3.1-9 - PAN.

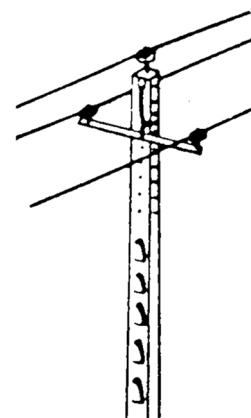


Figura 2.3.1-10 - TAL.

#### 2.3.4. Isoladores e Cadeias de Isoladores

Os isoladores têm como principal propósito evitar a passagem de corrente do condutor para o apoio e para o solo. “Os isoladores devem apresentar dimensões e formas apropriadas ao ambiente em que serão utilizados, à tensão eléctrica a que vão ser expostos e às tensões mecânicas que terão que suportar. Devem também apresentar elevada resistividade e rigidez dieléctrica.” (F. Gonçalves, 2011)<sup>2</sup>

Desta forma, deverão ser dimensionados de acordo com as solicitações eléctricas(sobretensões) a que poderão estar submetidos, podendo estas ser de origem interna ou externa à própria rede eléctrica, nomeadamente:

- Sobretensões de impulso devidas a descargas atmosféricas;
- Sobretensões internas sob a forma de impulso como consequência de uma alteração brusca do estado da rede – Sobretensões de manobra;

<sup>2</sup> Este autor parte de uma citação:

Pereira, A. (2006). *Estudos nos SEE*. Apontamentos da unidade curricular de Sistemas Eléctricos de Energia I, Licenciatura em Engenharia Electrotécnica, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

- Sobretensões sinusoidais à frequência industrial (Labegolini, Labegolini, Fuchs, & Almeida, 1992).

As sobretensões de impulso, apresentam valores muito elevados de tensão num intervalo de tempo bastante curto, poucas dezenas de microssegundos. Os outros tipos de sobretensão, caracterizam-se por ter um período longo de duração com uma amplitude não tão elevada. Assim, o dimensionamento de isoladores depende não só da amplitude da sobretensão como da respectiva duração (Labegolini et al., 1992).

Como resultado de um fraco dimensionamento, podem resultar fugas de corrente do condutor para o apoio que se sumarizam nos seguintes fenómenos:

- Condutividade através da massa dos isoladores – a corrente que resulta deste fenómeno considera-se insignificante;
- Perfuração superficial – acumulação de humidade e poeiras à superfície do isolador;
- Perfuração da massa do isolador – impurezas ou fissuras no seio da massa do isolador;
- Descarga disruptiva – estabelecimento de arco eléctrico entre o isolador e o apoio, através do ar. Acontece quando a rigidez eléctrica do ar diminui ou quando transita uma sobretensão na linha. (F. Gonçalves, 2011)

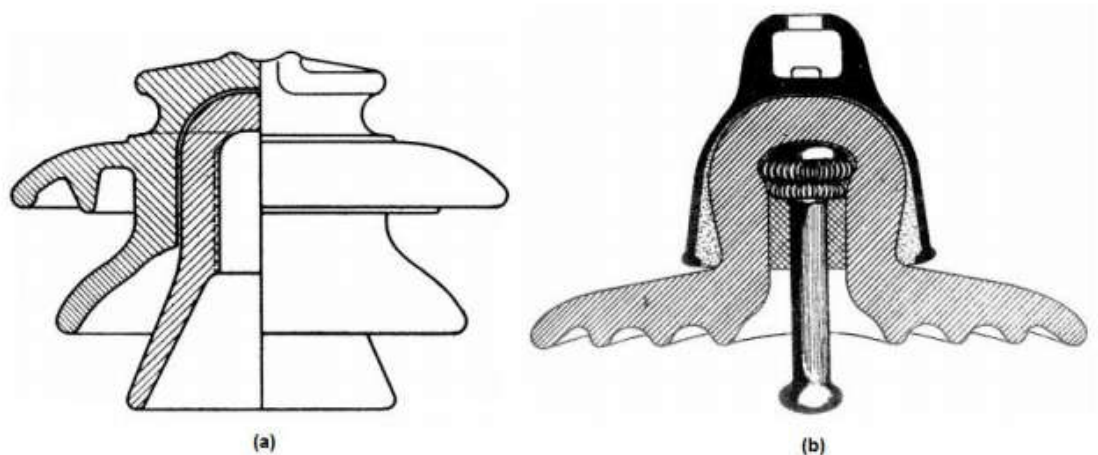
Como se viu, a poluição deteriora as características eléctricas do isolador. A poluição pode reduzir a tensão de disrupção de uma cadeia de isoladores padrão entre 20 a 25%. (Leonard L Grigsby, 2006) Por isto, isoladores devem ter linha de fuga adequada ao grau de poluição do local e ao nível de tensão da linha. (D.G.E., 1986)

Na tabela seguinte, representam-se os valores mínimos dos graus de isolamento recomendados consoante o nível de poluição que se verifica na região onde será implementada a linha.

**Tabela 2.3-1 - Nível de isolamento de acordo com o nível de poluição.**(Ramires, 2008)<sup>3</sup>

Nível de poluição	Tipificação ambiental	Linha de fuga mínima específica [mm/kV]
Fraca	Zonas agrícolas, montanhosas e com fraca densidade de indústrias situadas, no mínimo, a 10km da orla marítima.	16
Média	Zonas com indústrias não poluentes com grande densidade populacional, sujeitas a ventos e chuvas situadas, no mínimo, a 5km do mar.	20
Forte	Zonas de forte densidade populacional e industrial. A menos de 5 km do mar ou submetida a ventos marítimos fortes.	25
Muito Forte	Zonas sujeitas a poeiras industriais condutoras, zonas costeiras com ventos fortes e poluentes e zonas desérticas com tempestades de areia.	31

Para os isoladores expostos ao efeito de coroa, deverão ser equipados com hastes de descarga ou substituídos por outros maiores ou de forma mais adequada.(D.G.E., 1986)



**Figura 2.3.1-11-Tipos de isoladores: (a) Isoladores Rígidos; (b) Isolador para acoplamento em cadeia.**(Galvão, 2010)

<sup>3</sup> Este autor parte da citação seguinte:  
Távora, F. Linhas de transmissão de energia eléctrica.

Existem dois tipos de isoladores a empregar em linhas aéreas até 30kV: isoladores rígidos e cadeias de isoladores (Figura 2.3.1-11). Os isoladores rígidos, apesar de mais económicos, são fixados rigidamente ao contrário das cadeias de isoladores o que produz piores razões de segurança e manutenção. Como as cadeias de isoladores constituem isoladores soltos que são emparelhados, é mais fácil e mais económico, em caso de avaria, substituir apenas um elemento da cadeia. Por outro lado, a qualquer altura se pode aumentar o nível de isolamento de uma linha com a adição de mais isoladores (Galvão, 2010)<sup>4</sup>. Assim, a utilização de isoladores rígidos é uma prática pouco comum, sendo considerados obsoletos em comparação com as cadeias de isoladores.

As hastes de descarga, pouco utilizadas em média tensão, servem para proteger o isolador pois permitem o estabelecimento do arco entre elas antes que haja disrupção no isolador. Conduzindo, assim, a corrente para a terra sem danificar o isolador.

Em suma, os isoladores devem incorporar as seguintes propriedades:

- Alta resistência mecânica por forma a resistir à força exercida pelo condutor, pelo vento, etc.
- Alta resistência eléctrica do material isolante de forma a evitar correntes de fuga.
- Alta permissividade eléctrica do material isolante e elevada rigidez dieléctrica.
- O material isolante não deverá conter poros, impurezas ou fissuras sob pena de diminuição da permissividade. (Metha & Metha, 2005)

Os materiais mais utilizados como isolante são o vidro e a cerâmica. Apesar de a cerâmica apresentar melhor comportamento, o seu fabrico é mais exigente (logo mais caro) e a sua inspecção é mais difícil, isto é, as fissuras não são facilmente detectáveis por observação ao contrário dos isoladores em vidro. (Labegolini et al., 1992)

---

<sup>4</sup> Este autor parte da citação seguinte:

G. Zoppetti Júdez, Redes eléctricas de alta y baja tensión para conducir y distribuir la energía eléctrica, 5ª ed ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1972



Para além destes, existem isoladores poliméricos que apresentam um peso reduzido o que torna a sua instalação rápida e simples.

#### 2.3.5. *Condutores*

Os condutores são responsáveis por garantir o trânsito de energia eléctrica, para tal devem possuir, como principal característica, alta condutividade eléctrica.

Deverão ainda contemplar as seguintes características:

- Elevada resistência mecânica;
- Baixo custo – para poder ser usado em longas distâncias;
- Baixo peso específico. (Metha & Metha, 2005)

O cobre e o alumínio são os principais materiais utilizados no fabrico de condutores. O cobre possui elevada condutividade eléctrica mas é cada vez menos utilizado devido ao seu preço que é o dobro do alumínio, para a mesma quantidade. O alumínio é a solução mais adoptada (seja no estado puro, seja através de ligas) pois, apesar de possuir apenas 61% da condutividade do cobre, possui baixo peso específico que lhe confere mais do dobro de condutividade que o cobre por unidade de peso. (Labegalini et al., 1992)

O cobre apresenta quase o dobro de resistência mecânica do alumínio. Este problema é facilmente resolvido, recorrendo a ligas de alumínio ou empregando almas de aço. A escolha entre os vários tipos de cabos de alumínio, do ponto de vista da resistência mecânica, não é um factor determinante pois as solicitações mecânicas exigidas aos condutores são mantidas baixas, o que se pode comprovar facilmente uma vez que é manifestamente raro existir ruptura de condutores devido ao excesso de tracção. (Labegalini et al., 1992)

Os condutores mais utilizados, em linhas de média tensão, são em alumino-aço que, tal como já se referiu, possuem a alma em aço galvanizado, de um ou mais fios, envolvida por duas a três camadas sucessivas de fios de alumínio enrolados em hélice. A alma em aço permite maior resistência mecânica que se traduz numa redução da flecha que permite maiores vãos ou o uso de postes mais baixos. (Madureira, 2009; Metha & Metha, 2005)

### 2.3.6. Acessórios

#### 2.3.6.1. Balizagem Aérea

Sempre que um troço da linha aérea represente um obstáculo à navegação aérea, os apoios e os condutores devem ser balizados. O Instituto Nacional de Aviação Civil emitiu uma Circular de Informação Aeronáutica (CIA 10/03 de 06 de Maio) onde define os critérios a respeitar na balizagem diurna e na balizagem luminosa desses obstáculos. (EDP Distribuição, 2005a, 2011)

As balizagens diurnas são feitas por meio de bolas de balizagem (balizas) colocadas ao longo dos condutores. A cor das balizas deverá ser branca, vermelha ou laranja, e deve ser escolhida a que apresentar maior contraste com o meio envolvente. São utilizadas duas cores, alternadas, nos casos em que se utilizam cinco balizas ou mais. (EDP Distribuição, 2011)

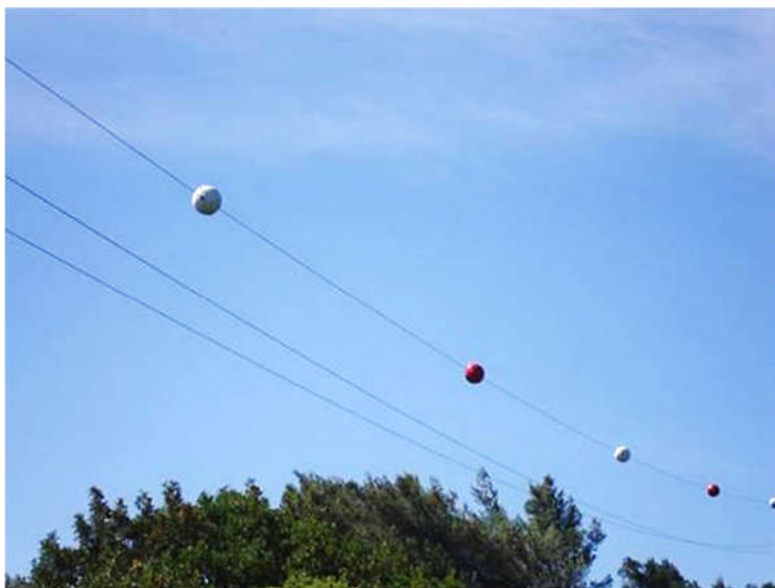


Figura 2.3.1-12 - Balizagem diurna de linhas aéreas.

A sinalização nocturna é feita com luzes de cor vermelha e cuja intensidade deverá ser constante e suficiente para serem distinguidos das luzes adjacentes bem como da iluminação do ambiente em que se inserem. (EDP Distribuição, 2005b)



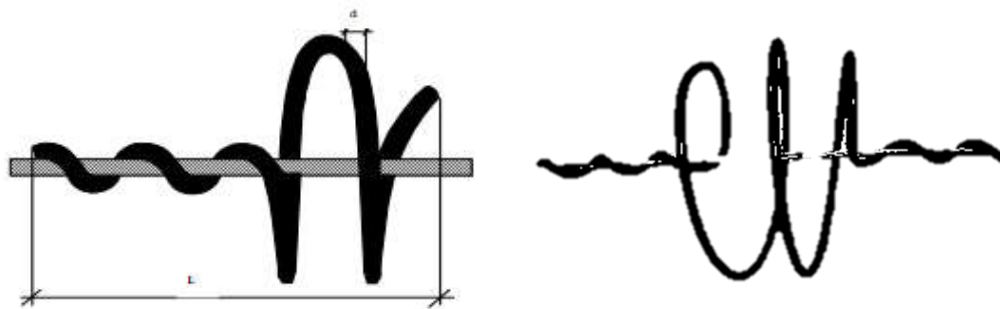
**Figura 2.3.1-13 - Balizagem nocturna de linhas aéreas.** (Cunha, 2008)

#### 2.3.6.2. *Sinalização para Avifauna*

As linhas aéreas, devido à sua exposição, é alvo de interacções com as aves: como poiso, local de nidificação, etc. Desta forma, as aves estão expostas à electrocussão quanto poisam ou a colisão durante o voo. (SPEA & ANCN, 2005)

A electrocussão resulta quando a ave estabelece contacto entre dois elementos condutores com potenciais diferentes, podendo ser mortal de acordo com a intensidade de corrente eléctrica que percorre o seu corpo.

São, então, utilizadas formas de prevenir ambas as situações. Para evitar a colisão são utilizados uns dispositivos denominados salva-pássaros que consistem em espirais de polipropileno ou PVC, de cor branca vermelha ou laranja. Nestes dispositivos não se deverá verificar um afastamento superior a 5 metros nos condutores de fase (alternadamente, isto é, de 15 em 15 metros por fase). A espiral pode ser dupla ou simples, como na figura seguinte: (EDP Distribuição, 2013)



**Figura 2.3.1-14 -Salva-pássaros com espiral simples (figura à esquerda) e com espiral dupla (figura à direita). (EDP Distribuição, 2013)**

Para evitar colisões, existe, ainda, o dispositivo de sinalização Firefly Bird Flapper/Diverter. Este dispositivo possui um pino giratório que permite a rotação de um material luminescente de diferentes cores que reflecte a radiação UV e visível, até cerca de 400 metros, mesmo em situações de reduzida luminosidade e ainda durante a noite (por um período de 10 horas).(EDP Distribuição, 2013)

De forma a evitar a electrocussão das aves, são utilizados protectores de condutor que consistem em mangas de plástico resistentes que são aplicadas nos condutores de fase. São ainda utilizados protectores de pinça de amarração, como se pode ver na figura seguinte.



**Figura 2.3.1-15 - Protecção de fase num apoio de amarração por meio de protectores de pinça de amarração em conjunto com cobertura flexível de protecção de condutor. (EDP Distribuição, 2013)**

Contra a electrocussão pode ser também empregado um anel de protecção que se destina a impedir os contactos entre condutores de fase nus quando um grande número de aves levanta voo em simultâneo. São usados de forma alternada a cada 20 metros (de 60m em 60 m por condutor de fase). (EDP Distribuição, 2013)

São, ainda, utilizados elementos dissuasores que impedem o poiso e a nidificação, tais como a turbina.

#### 2.3.6.3. Redes de Terras

As redes de terras são fundamentais na protecção de pessoas contra contactos indirectos, isto é, quando existe um elemento condutor que é colocado acidentalmente sob tensão resultante de um defeito. Esta corrente de defeito circula, provocando uma elevação do potencial entre esse elemento e a terra, originando uma tensão de defeito que pode ser perigosa.

Desta forma, toda a aparelhagem metálica necessária ao suporte dos condutores e ao seccionamento e protecção das linhas, deverá ser ligada à terra.

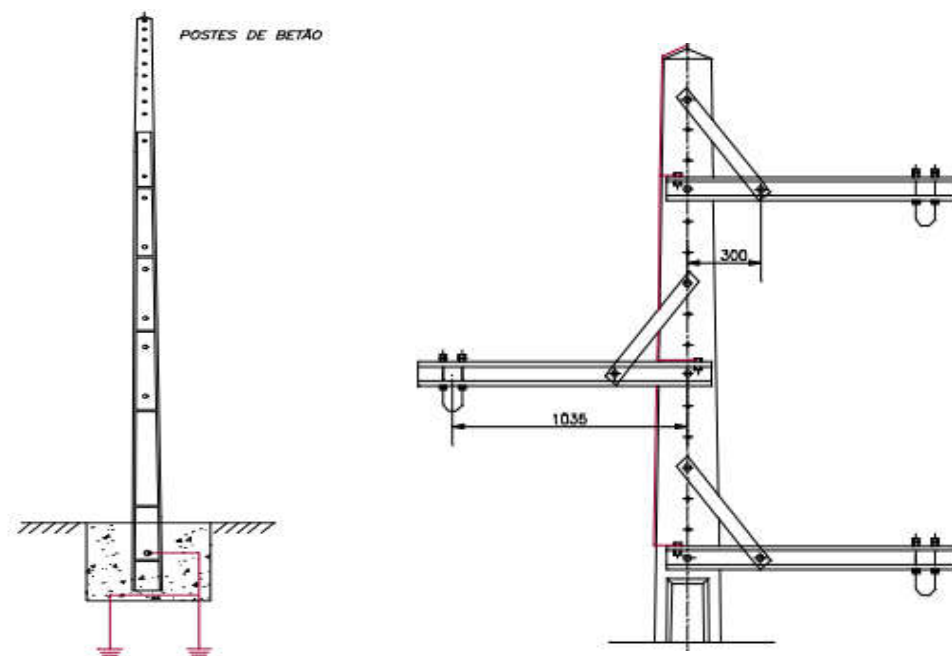


Figura 2.3.1-16 - Ligação do apoio aos eléctrodos de terra, na figura à esquerda. Ligação da armação à terra, na figura à direita (A vermelho). (EDP Distribuição 2010)

Estabelece o art. 147.º do RSLEAT que todos os apoios a estabelecer em linhas de Média Tensão deverão ser individualmente ligados à terra e, ainda, quando utilizados apoios de betão, os suportes metálicos dos isoladores deverão ser ligados à terra do próprio apoio. A ligação dos condutores de terra aos eléctrodos deverá garantir a natureza ou o revestimento dos materiais aplicados, não dando origem a corrosões electrolíticas. (*Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia*, 1992)

As normas internas da EDP Distribuição estabelecem que as armações devem ser ligadas à terra através de um condutor de cobre com secção de 16 mm<sup>2</sup>, devendo este interligar todas as ferragens constituintes da armação com o terminal de terra existente na parte superior do poste. Refere, ainda, que os postes devem ser ligados à terra, interligando o terminal existente na sua parte inferior ao eléctrodo terra, através de um cabo de cobre de 35 mm<sup>2</sup>. O valor da resistência de terra não deverá ser superior a 20 ohm. (EDP Distribuição, 2010)



## Capítulo 3

### 3. CÁLCULO MECÂNICO E ELÉCTRICO

A compreensão dos fenómenos físicos e eléctricos é essencial para a formação do espírito crítico e maior segurança na tomada de decisões neste âmbito.

Neste capítulo, são introduzidos os conceitos fundamentais para o entendimento dos cálculos utilizados no projecto de linhas aéreas de média tensão. Estes cálculos permitem o correcto dimensionamento dos elementos da linha, estudados no capítulo anterior.

A optimização deste tipo de projectos é, tanto melhor, quanto maior for a experiência do projectista mas pode ser alcançada se forem claramente percebidos e respeitados os preceitos que conduzem à sua execução. Por isto, neste capítulo, pretende-se esclarecer estes conceitos para que o cálculo eléctrico e mecânico seja exposto com maior clareza.

### ***3.1. Metodologia do Cálculo***

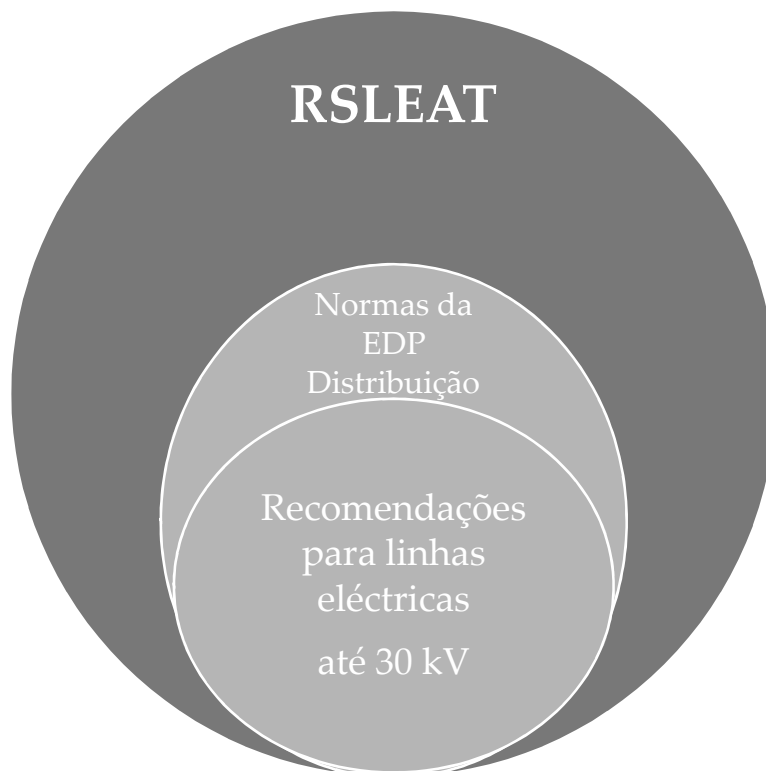
Os métodos que se utilizam no cálculo mecânico e eléctrico estão estabelecidos ou limitados nos documentos normativos que se expõem neste tópico.

O Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão(RSLEAT) é o decreto regulamentar que define as condições de segurança mínima que têm de ser respeitados obrigatoriamente. Este documento aplica-se a todas as linhas com tensão nominal superior a 1kV.

As Recomendações para linhas eléctricas de Alta Tensão até 30kV consistem num documento que pretende otimizar e uniformizar as soluções, quer dos materiais utilizados nas linhas, quer do projecto destas. As recomendações têm importância, não só para a fase de projecto, como para a execução e exploração das linhas. Estas recomendações abrangem a generalidade dos problemas mais comuns nas linhas de alta tensão até 30kV.

Existem, ainda, os documentos normativos da EDP Distribuição cuja finalidade consiste na normalização de novos materiais cuja necessidade não foi reconhecida na elaboração das Recomendações *supra* referidas. Esta actualização deve-se, por exemplo, à constante evolução da sociedade e da tecnologia disponível. Contudo, a uniformização de novos elementos respeita a filosofia seguida nas recomendações por se reconhecer a sua eficácia.





No diagrama acima apresentado pretende ilustrar-se o que já foi dito: O regulamento contempla muito mais situações que as ditas recomendações. É também visível que as normas da EDP Distribuição representam um acréscimo ao que está estabelecido nestas recomendações por serem uma tentativa de as transportar para a realidade actual.

### ***3.2. Cálculo Mecânico***

O cálculo mecânico é fundamental para assegurar a estabilidade da linha e para garantir que são cumpridas as exigências de segurança nas condições mais adversas.

Para tal, deverão ser dimensionados os apoios para as condições atmosféricas mais desfavoráveis e deverá ser determinada a sua altura de acordo com as distâncias a que os condutores se devem encontrar dos obstáculos.

Deverá ser estabelecida uma tensão mecânica máxima, por forma a garantir que os condutores não são solicitados a uma tensão mecânica superior a esta independente das condições atmosféricas. Deve ainda estar contemplado o afasta-

mento mínimo entre condutores, para que estes não se aproximem perigosamente na sequência de oscilações provocadas pelo vento, de modo a evitar que se formem eventuais arcos eléctricos entre eles.

Para isto, é fundamental o estudo do comportamento dos condutores em diferentes condições e sujeitos a acções externas como o vento e o gelo.

### 3.2.1. *Cálculo da Tracção Máxima*

Inicialmente, deve ser definido um valor de tracção máximo horizontal a aplicar em todos os vãos da linha. Este valor corresponde à tensão mecânica máxima a que os cabos estarão sujeitos naquele que for considerado o estado atmosférico mais desfavorável. Este valor não pode ser superior a 40% da tensão mecânica de ruptura do condutor segundo o artº24 do RSLEAT.(Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

A tracção máxima,  $t_{max}$ , é determinada tendo em consideração que:

- Quanto menor for a tensão mecânica  $t_{max}$  maior será a flecha;
- Quanto maior a tensão mecânica  $t_{max}$ , maiores os esforços mecânicos solicitados aos apoios.

Geralmente este valor fica compreendido no intervalo [7; 9] daN/mm<sup>2</sup> pelo que os esforços resultantes não são muito elevados. (Leite, 2008)

### 3.2.2. *Estados Atmosféricos*

Devido às condições de utilização em que está inserida, a linha, bem como todos os elementos que a constituem, é afectada pelos fenómenos atmosféricos, nomeadamente o vento, a temperatura e o gelo. Estes factores variam ao longo do ano, de acordo com as estações do ano mas também dependem da região onde se pretende implantar a linha, mais concretamente, a cota a que se encontra a região informa sobre a possível existência de gelo. Em Portugal, de acordo com o artº21 do decreto regulamentar 1/92, podemos reduzir estas variações ao longo do ano a três estados atmosféricos(Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992):

- O estado de Inverno em que se considera existência de vento reduzido, baixas temperaturas e, de acordo com a região considerada, existência ou não de manga de gelo.
- O estado de Primavera, ou estado de vento máximo, é caracterizado pela existência de ventos fortes, ou vento máximo habitual, temperaturas amenas e sem presença de manga de gelo.
- O estado de Verão, ou estado de flecha máxima, é o estado em que se considera a maior temperatura previsível para a região, considera-se ainda a inexistência de vento e de gelo. A designação flecha máxima está relacionada com as temperaturas altas que se consideram, uma vez que os condutores dilatam, segundo um coeficiente de dilatação que varia de acordo com o tipo condutor, provocando um aumento da flecha.

Deste modo, no Verão, com a dilatação dos condutores, a tensão mecânica longitudinal diminui. Já no Inverno, como a flecha diminui, o esforço horizontal aumenta.

A

Tabela 3.2-1, que se apresenta de seguida, apresenta os valores estipulados e previstos no RSLEAT de temperatura de acordo com os diferentes estados. (*Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia*, 1992)

Tabela 3.2-1 – Valores de Temperatura para os diferentes estados.

Inverno		Primavera	Verão	
Sem gelo:	-5°C	15°C	$Un \leq 40kV$	50°C
Com gelo:	-10°C		$40kV \leq Un \leq 100kV$	65°C
			$100kV < Un$	75°C

### 3.2.3. Curva Característica de um Cabo Suspenso

A curva que representa os condutores de uma linha aérea, em equilíbrio, suspensos entre dois pontos razoavelmente afastados entre si e a uma altura que garanta que não se apoiam sobre o solo é conhecida como a catenária. Para isto, ocorre-se na simplificação de considerar os condutores perfeitamente flexíveis e inextensíveis apesar de, na realidade, os condutores não apresentarem características ideais: são elasticamente deformáveis e estão expostos à acção de ventos imprevisíveis. (Labegalini et al., 1992; Madureira, 2009)

A curva traçada pelos condutores é afectada pela diferença entre os dois níveis em que estão os pontos de suspensão dos condutores. Assim, o vão pode achar-se numa das seguintes formas: em patamar ou em plano inclinado.

#### 3.2.3.1. *Vão em Patamar*

A equação da catenária, que descreve a curva num vão em patamar, está representada na expressão seguinte:

$$y(x) = P \cdot \left( \cosh \left( \frac{x}{P} \right) - 1 \right) \quad (3.2-1)$$

Onde P representa o parâmetro de curvatura da catenária, isto é, o raio de curvatura no ponto onde a tangente à curva é horizontal. Com o aumento deste valor, a curva diminui a sua concavidade e, desta forma, a sua flecha diminui.

P é obtido da seguinte forma:

$$P = \frac{t \cdot \sigma}{w} = \frac{H}{w} \quad (3.2-2)$$

**t** – tensão de montagem [daN/mm<sup>2</sup>]

**σ** – secção do condutor [mm<sup>2</sup>]

**w** – peso próprio do condutor [daN/m]

**H** – componente horizontal da tracção de montagem [daN]

Sem o auxílio do cálculo computacional, antigamente, as funções hiperbólicas exigiam o uso de tabelas muito precisas (com muitas casas decimais) factor que hoje é facilmente superado. Contudo, não é possível, com as equações hiperbólicas, obter directamente as flechas em função da temperatura e da tensão.(Galvan, 1997)

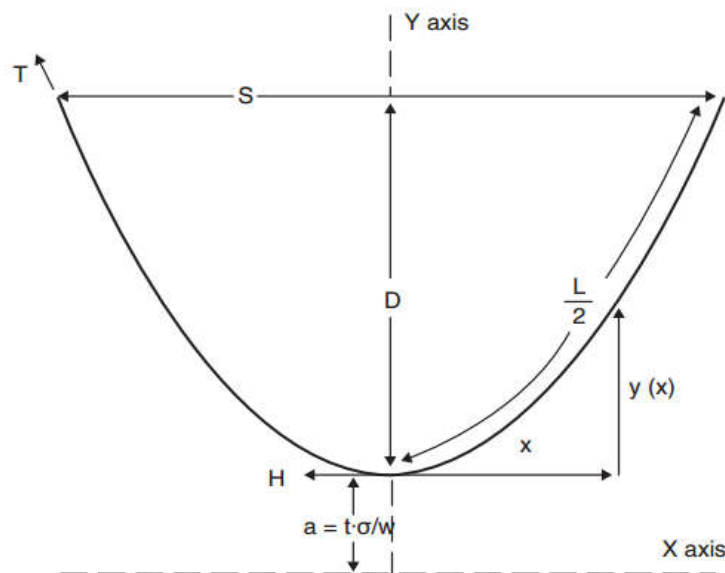


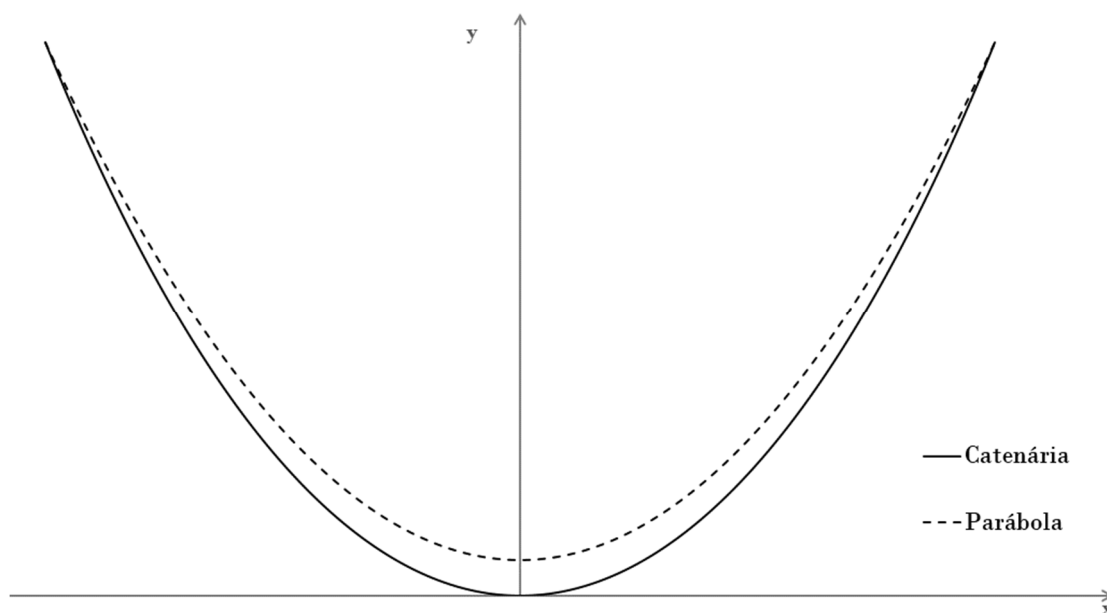
Figura 2.3.1-1 - Curva da catenária para vão em patamar.(Leonard L Grigsby,

A curva encontrada que mais se aproxima da catenária é obtida através de uma aproximação parabólica baseada na expansão da série de MacLaurin do cosseno hiperbólico. Esta parábola osculatriz não aumenta excessivamente o erro na descrição da curva desde que dentro de certos limites (vãos menores que 700/800 metros).(Galvan, 1997)

Partindo da série convergente, obtém-se a seguinte expressão(Leonard L Grigsby, 2006):

$$y(x) = \frac{x^2}{2P} \quad (3.2-3)$$

Através da equação, é possível constatar que  $x^2$  é positivo em qualquer direcção, partindo do fundo da curva. A figura seguinte apresenta a relação entre a catenária e a parábola, quando sujeitas aos mesmos pontos de fixação.



**Figura 2.3.1-2- Relação entre a curva descrita pela equação da parábola com a equação da catenária.**

Então se L for o comprimento total do vão, como a curva é simétrica e os pontos de fixação estão à mesma altura, o ponto mais baixo da curva está exactamente ao centro, em L/2 portanto, valor que é usado no cálculo da flecha máxima. (Leonard L Grigsby, 2006; Labegalini et al., 1992)

Assim sendo a flecha máxima fica com o seguinte valor:

$$f = P \cdot \left( \cosh \left( \frac{L}{2P} \right) - 1 \right) \quad (3.2-4)$$

E, utilizando a aproximação parabólica:

$$f = \frac{L^2}{8P} \quad (3.2-5)$$

O comprimento total do condutor, S(x), pode ser calculado através da aplicação da equação da catenária, medido a partir do ponto mais baixo do vão para cada uma das direcções. A equação (3.2-6) representa o comprimento total de um vão genérico e a equação (3.2-7) considerando o vão em patamar: (Leonard L Grigsby, 2006)

$$S(x) = P \cdot \sinh \left( \frac{x}{P} \right) = x \cdot \left( 1 + \frac{x^2}{6P^2} \right) \quad (3.2-6)$$

$$S = 2P \cdot \sinh\left(\frac{L}{2P}\right) = L \cdot \left(1 + \frac{L^2}{24P^2}\right) \quad (3.2-7)$$

O comprimento total do condutor pode ser ainda calculado através da equação parabólica, em função da flecha  $f$ , obtendo-se: (Leonard L Grigsby, 2006)

$$S = L + \frac{8f^2}{3L} \quad (3.2-8)$$

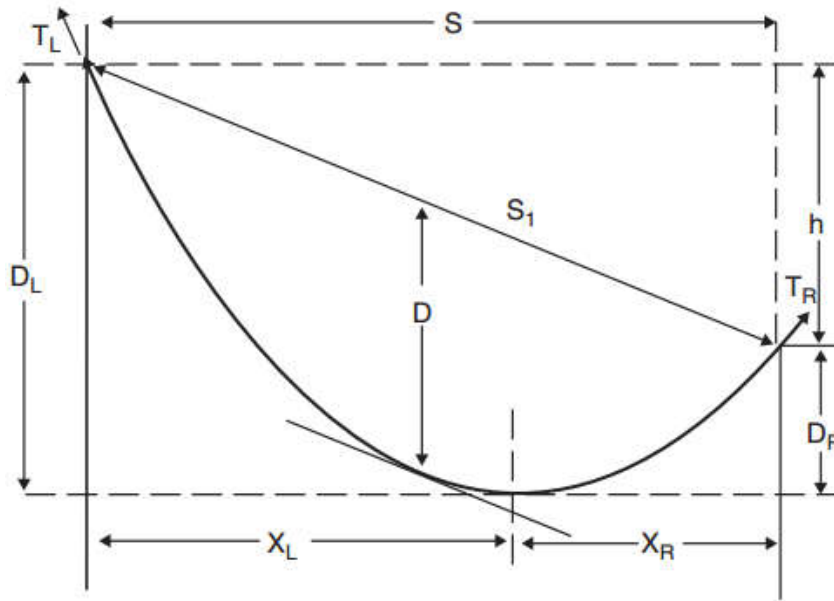
A tracção  $T$  varia ao longo da curva, ao contrário da tracção horizontal  $H$ , tendo o seu máximo junto aos pontos de fixação e o mínimo junto ao vértice da curva: (Labegalini et al., 1992)

$$T = H \cdot \cosh\left(\frac{x}{P}\right) \quad (3.2-9)$$

#### 3.2.3.2. *Vão Desnivelado*

É bastante comum que os pontos de fixação dos condutores se situem a diferentes níveis de altura e, nessa situação, o vão deixa de estar em patamar e passa a estar desnivelado. (Pedreira, 2013; Sequeira, 2009)

Num vão inclinado, a curva descrita pelos condutores continua a ser representada pela equação (3.2-1) com a especial diferença de que o ponto mais baixo não se encontra a meio do vão. Como se pode ver na Figura 2.3.1-3, o vão passa a dividir-se a partir do ponto mais baixo para a esquerda e desse ponto para a direita. (Leonard L Grigsby, 2006)



**Figura 2.3.1-3- Vão desnivelado.**(Leonard L Grigsby, 2006)

E as distâncias horizontais ao ponto mais baixo ao apoio esquerdo e ao apoio direito dependem do valor da flecha,  $f$  (representado com  $D$  na figura), e são, respectivamente, dadas por: (Leonard L Grigsby, 2006)

$$x_L = \frac{L}{2} \cdot \left(1 + \frac{h}{4f}\right) \quad (3.2-10)$$

$$x_R = \frac{L}{2} \cdot \left(1 - \frac{h}{4f}\right) \quad (3.2-11)$$

Onde  $L$  representa o comprimento total do vão,  $h$  a diferença de alturas entre os apoios e  $f$  o valor da flecha (medido desde a recta que une os pontos de fixação do condutor aos apoios até à recta tangente ao condutor).

A diferença de alturas entre os pontos de fixação, ou o desnível, é obtido da seguinte forma: (Labegalini et al., 1992)

$$h = y_L - y_R = P \cdot \left(\cosh\left(\frac{x_L}{P}\right) - \cosh\left(\frac{x_R}{P}\right)\right) \quad (3.2-12)$$

De acordo com (Ferreira, 2010), esta expressão é simplificada obtendo-se:

$$h \approx \frac{x_m \cdot L}{P} \quad (3.2-13)$$

Onde  $x_m$  corresponde a  $(x_L + x_R)/2$ .



Na Figura 2.3.1-3, se a recta for prolongada, partindo do ponto TR, até à altura do ponto TL, de forma a obter um vão em patamar, o comprimento do vão equivalente, ou vão fictício, terá o seguinte valor:(Labegalini et al., 1992)

$$L_{eq} = L + L' \quad (3.2-14)$$

Onde  $L'$  representa o comprimento adicional resultante do prolongamento até ao ponto TL. Segundo o mesmo autor,  $L'$  toma o seguinte valor:

$$L' = \frac{2h}{L}P \quad (3.2-15)$$

A qual permite colocar a equação (3.2-14) em função do comprimento do vão e de outras variáveis conhecidas:

$$L_{eq} = L + \frac{2h}{L}P \quad (3.2-16)$$

Como se viu na equação (3.2-9), tensão  $T$  varia ao longo da curva e, por isso, existem valores diferentes de tensão para o apoio mais elevado e para o apoio mais baixo. Concretizando, a tensão consistirá na soma da componente horizontal da tracção de montagem,  $H$ , com as componentes de carga vertical para cada apoio. As tensões resultantes para o apoio mais elevado ( $T_L$ ) e para o mais baixo ( $T_R$ ) estão expostas, respectivamente, nas seguintes equações: (Labegalini et al., 1992)

$$T_L = H + f_{eq} \cdot w \quad (3.2-17)$$

$$T_R = H + w \cdot (f_{eq} - h) \quad (3.2-18)$$

Onde  $f_{eq}$  corresponde à flecha do vão equivalente que, por aplicação da equação (3.2-5), que diz respeito à flecha de vãos em patamar, resulta:

$$f_{eq} = \frac{L_{eq}^2}{8P} \quad (3.2-19)$$

No vão inclinado o comprimento total do condutor,  $S$ , pode ser obtido através da soma dos arcos da parte esquerda e direita em relação ao ponto mais baixo. (Leonard L Grigsby, 2006)

$$S = L + \frac{(x_L^3 + x_R^3)}{6P^2} \quad (3.2-20)$$

Para o valor da flecha, considera-se o seguinte resultado:(Ferreira, 2010; Labegalini et al., 1992; Sequeira, 2009)

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{y_L - y_R}{2} - y_m \\
 &= \frac{1}{2} \left( P \cdot \cosh\left(\frac{x_L}{P}\right) + P \cdot \cosh\left(\frac{x_R}{P}\right) - 2P \right) \\
 &\quad - \left( P \cdot \cosh\left(\frac{x_m}{P}\right) - P \right) \approx \frac{S^2}{8P} \cdot \left( 1 + \frac{S^2}{48P^2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.2-21}$$

### 3.2.3.3. Vão Contínuo

Os tópicos anteriores foram tratados como casos de vãos isolados mas, na realidade, estes casos são pouco frequentes. Na maioria das situações, os vãos são contínuos, i.e., cantões. Os cantões correspondem a uma sequência de vãos compreendidos entre duas amarrações consecutivas havendo, entre estas, fixação dos condutores por suspensão.

Para estes casos, os pontos de suspensão não são tão rígidos como os considerados anteriormente e, deste modo, os esforços são transmitidos de um vão para o outro, através do condutor, situados no mesmo cantão. Existe, portanto, necessidade de estudar as várias possibilidades.(Labegalini et al., 1992; Pedreira, 2013)

#### ➔ Primeiro caso: Vãos com apoios ao mesmo nível

Para este caso considera-se a Figura 2.3.1-4 em que o comprimento dos vãos é o mesmo e o apoio central é de suspensão, permitindo que a cadeia de isoladores se desloque por forma a mitigar eventuais solicitações mecânicas. Neste caso, as curvas serão iguais para ambos os vãos.

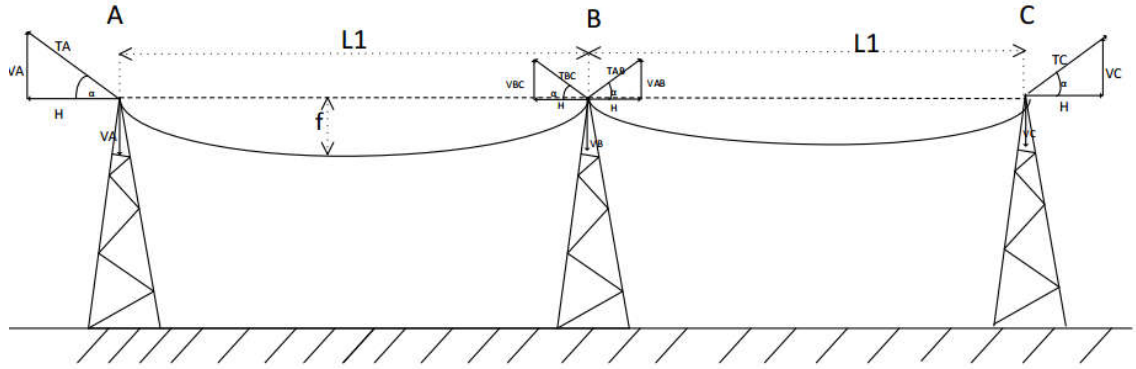


Figura 2.3.1-4 – Cantão em patamar com apoio central em suspensão. (Pedreira, 2013)

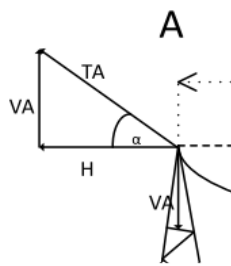


Figura 2.3.1-5 - Apoios de fim de linha. Ampliação da figura principal.

Os apoios de fim de linha, neste caso A e C, possuem uma força resultante com componente vertical e componente horizontal. A componente vertical,  $V_A$  e  $V_C$ , resulta do peso do condutor até ao meio vão adjacente, obtendo-se:

$$V_A = V_C = w \cdot \frac{L_1}{2} \quad (3.2-22)$$

A componente longitudinal deve-se à componente horizontal da tracção de montagem,  $H$ , aplicada ao condutor:

$$T_A = T_C = \frac{H}{\cos(\alpha)} \quad (3.2-23)$$

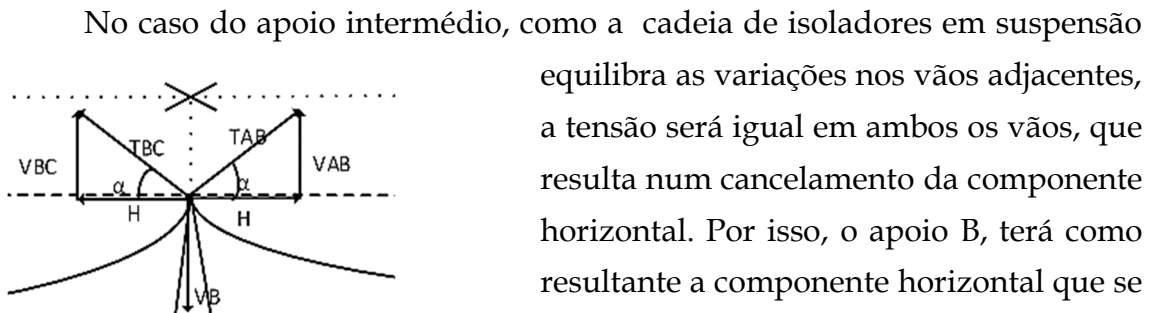


Figura 2.3.1-6 - Apoios intermédio. Ampliação da figura principal.

No caso do apoio intermédio, como a cadeia de isoladores em suspensão equilibra as variações nos vãos adjacentes, a tensão será igual em ambos os vãos, que resulta num cancelamento da componente horizontal. Por isso, o apoio B, terá como resultante a componente horizontal que se deve ao peso do condutor nos meios vãos que lhe são adjacentes:

$$V_B = 2 \cdot \left( w \cdot \frac{L_1}{2} \right) = w \cdot L_1 \quad (3.2-24)$$

Daqui também se conclui que a colocação de apoios intermédios permite reduzir a flecha e os esforços horizontais e verticais provenientes do condutor, havendo, no entanto, um custo acrescido associado à estrutura adicional.

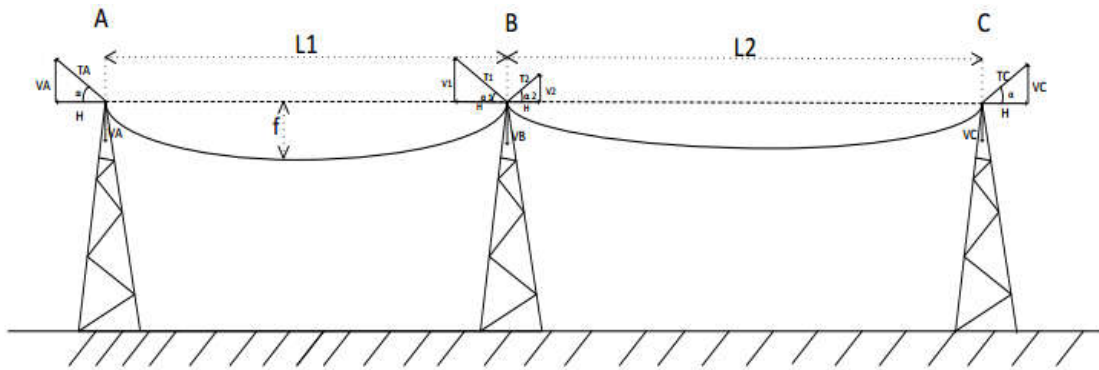
➔ Segundo caso: Cantão em patamar com vãos distintos

Para este caso consideram-se os vãos com diferentes comprimentos, mantendo a altura igual por forma a simplificar a análise. Esta situação está exemplificada na Figura 2.3.1-7.

Nesta situação, como os apoios de fim de linha possuem vãos adjacentes de diferentes comprimentos, o esforço vertical será diferente, dado por:

$$V_A = w \cdot \frac{L_1}{2} \quad (3.2-25)$$

$$V_C = w \cdot \frac{L_2}{2} \quad (3.2-26)$$



**Figura 2.3.1-7 Cantão em patamar com vãos de diferentes comprimentos.**(Pedreira, 2013)

A tracção axial,  $H$ , é igual ao longo do vão, sendo absorvida pelos apoios terminais e, portanto, fica:

$$T_A = T_C = \frac{H}{\cos(\alpha)} \quad (3.2-27)$$

Como se pode analisar através da Figura 2.3.1-7, a tracção horizontal não se anula no apoio central, existindo uma resultante que resulta da variação do ângulo  $\alpha$ , já que  $H$  se mantém constante.

A componente horizontal no apoio B fica então: (Pedreira, 2013)

$$T_B = T_{BC} - T_{AB} \quad (3.2-28)$$

O suporte intermediário irá suportar, ainda, um esforço vertical que se deve ao peso dos condutores dos semi-vãos adjacentes. (Pedreira, 2013)

$$V_B = \left( w \cdot \frac{L_1}{2} \right) + \left( w \cdot \frac{L_2}{2} \right) = w \cdot \frac{(L_1 + L_2)}{2} \quad (3.2-29)$$

Por fim, as flechas serão proporcionais ao quadrado da razão dos vãos, sendo maiores nos vãos maiores. (Labegalini et al., 1992)

$$f_1 = f_2 \cdot \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2 \quad (3.2-30)$$

➔ Terceiro Caso: Cantão inclinado com vãos de comprimentos distintos

Este caso consiste numa sucessão de vãos com comprimentos distintos e com alturas diferentes é, por isso, o caso mais frequente nas linhas de transmissão. (Labegalini et al., 1992)

Na Figura 2.3.1-8 ilustra-se um exemplo concreto deste caso: Um vão com três apoios desnivelados entre si e cujos vãos não têm o mesmo comprimento.

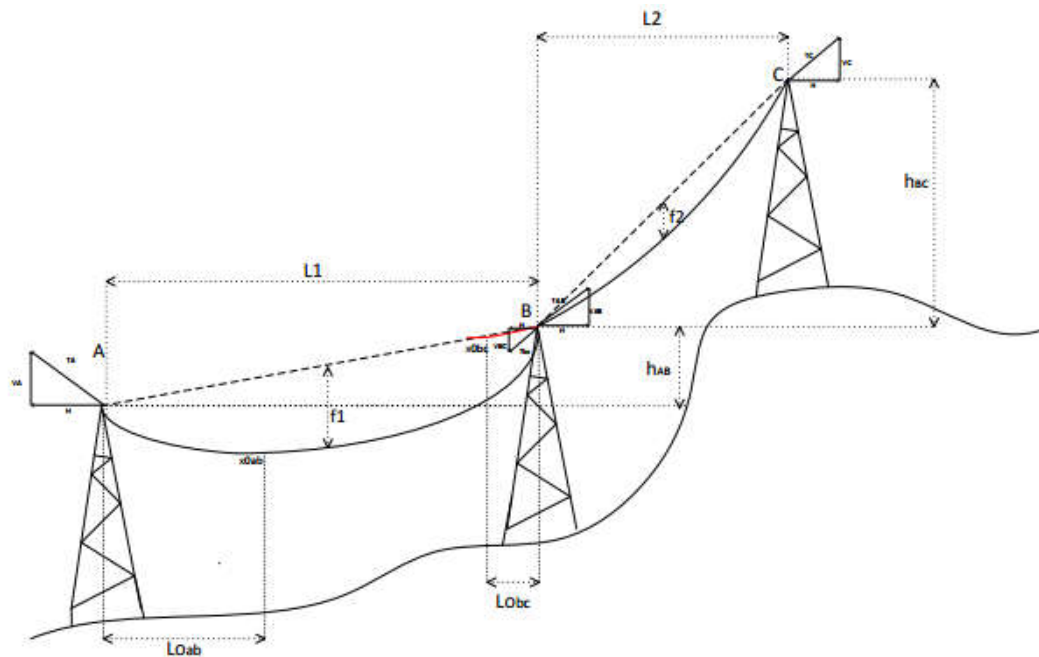


Figura 2.3.1-8 - Cantão em declive com vãos de diferentes comprimentos. (Pedreira, 2013)

Tomando como ponto de partida as deduções feitas nos casos anteriores, e usando a nomenclatura presente na figura, procede-se à análise deste caso concreto.

O vão  $L_1$ , é um vão desnivelado, semelhante ao caso estudado anteriormente.

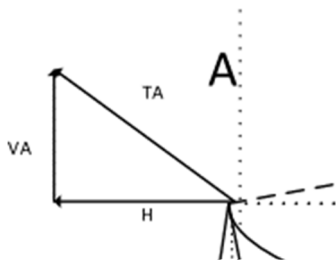


Figura 2.3.1-9 - Apoios mais baixo. Ampliação da figura principal.

Assim, o apoio A deve ser visto como o apoio mais baixo deste vão e por isso, a tensão horizontal a que está sujeito é dado pela equação (3.2-18) e está sujeito a um esforço vertical, devido ao peso do condutor até ao ponto mais baixo da curva. (Pedreira, 2013)

$$T_A = H + w \cdot (f_{eq1} - h_{ab}) \quad (3.2-31)$$

$$V_A = LOab \cdot w \quad (3.2-32)$$

Quanto ao apoio C, deve ser tratado da mesma perspectiva que o apoio A com as devidas correcções, isto é, o vão  $L_2$  é também um vão inclinado no qual o apoio C é o mais elevado. Assim, a equação para a tracção horizontal deriva da equação (3.2-17)

$$T_C = H + f_{eq2} \cdot w \quad (3.2-33)$$

O esforço vertical a que este apoio está sujeito depende do prolongamento da catenária, que irá ter o seu ponto mais baixo à esquerda do apoio B, e que se verifica na seguinte equação: (Pedreira, 2013)

$$V_C = (L_2 + LObc) \cdot w \quad (3.2-34)$$

Finalmente, o apoio B, na sequência do que foi feito para os apoios anteriores, caracteriza-se como o apoio mais elevado do vão esquerdo bem como o apoio mais baixo do vão à sua direita. Desta forma ambos as tensões e esforços devem ser considerados simultaneamente.

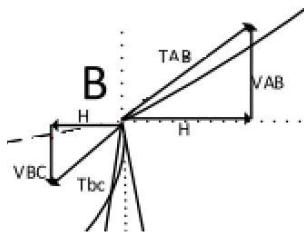


Figura 2.3.1-10 - Apoios central. Ampliação da figura principal.

Assim, relativamente ao esforço vertical, há que ter em consideração que o ponto mais baixo do vão complementar ao vão  $L_2$  se situa à esquerda do apoio B, o que implica uma um esforço negativo, ou seja: (Pedreira, 2013)

$$V_B = V_{BA} - V_{BC} = ((L_1 - L_{Oab}) - L_{Obc}) \cdot w \quad (3.2-35)$$

Por fim, a tracção horizontal é igual à resultante das tracções a que está sujeito:

$$\begin{aligned} T_B = T_{BA} - T_{BC} &= (H + f_{eq1} \cdot w) - (H + w \cdot (f_{eq2} - h_{bc})) \\ &= w \cdot (f_{eq1} - f_{eq2} + h_{bc}) \end{aligned} \quad (3.2-36)$$

#### Caso especial: O apoio enforcado

Esta situação, como se constata de seguida, é um caso específico da última situação analisada. O apoio enforcado consiste num apoio em suspensão colocado a uma altura consideravelmente inferior à altura dos apoios adjacentes e está representado na Figura 2.3.1-11.

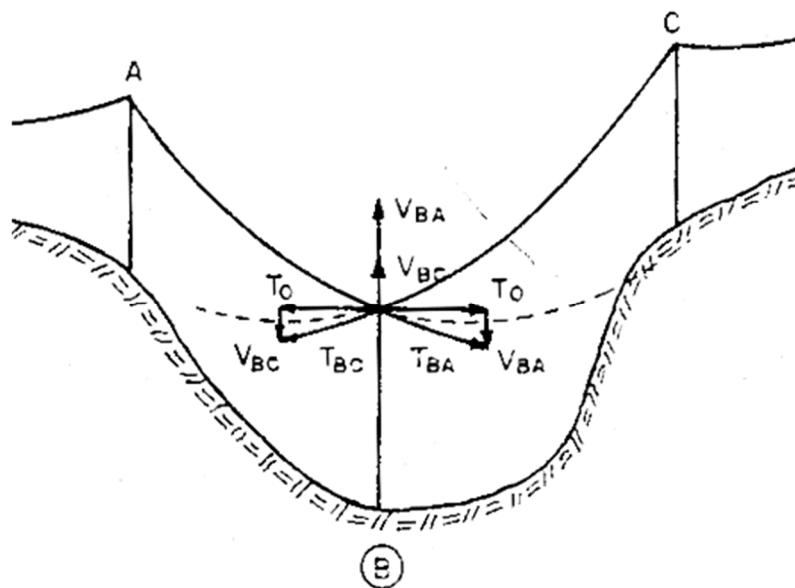


Figura 2.3.1-11- Situação de enforcamento do apoio B.(Labegolini et al., 1992)

Analisando a figura, facilmente se constata que o apoio B é solicitado com esforços verticais negativos, isto é, de baixo para cima. Estes esforços podem levar à inversão da posição dos isoladores podendo mesmo alguns serem arrancados. O esforço é, então, dado por:(Labegolini et al., 1992; Pedreira, 2013)

$$V_B = -(V_{BA} + V_{BC}) \quad (3.2-37)$$

Esta situação deve ser evitada sempre que possível e pode ser evitada recorrendo a uma escolha do traçado mais adequada ou, caso não haja outra opção, à fixação dos condutores por amarração em detrimento da suspensão.

#### 3.2.4. Vão Equivalente ou Fictício

Anteriormente, referiu-se que a fixação dos condutores pode ser feita através de cadeias de isoladores em suspensão ou em amarração. Os condutores que se fixam através da amarração não sofrem variação de posição no espaço, independentemente dos esforços transmitidos pelos condutores. No caso das cadeias



de suspensão, a cadeia de isoladores move-se no sentido do esforço de forma a equilibrar as tracções em ambos os vãos adjacentes. (Sequeira, 2009)

O conceito de cantão já foi introduzido anteriormente e representa um conjunto sucessivo de vãos compreendidos entre duas amarrações. Num cantão a tracção será sempre a mesma para todos os vãos uma vez que as cadeias de suspensão se movem no sentido do esforço e, como consequência disso, as componentes horizontais das tracções são iguais.

O vão equivalente ou fictício,  $\mathfrak{f}$ , representa o vão que, para um dado cantão, permitiria manter as cadeias de suspensão sempre verticais, independentemente do estado atmosférico. Vem então: (Checa, 1988)

$$\mathfrak{f} = \sqrt{\frac{\sum_i^n L_i^3}{\sum_i^n L_i}} \quad [m] \quad (3.2-38)$$

Onde  $L_i$  representa o comprimento do vão  $i$  do cantão considerado.

A expressão anterior só pode ser aplicada a cantões que se encontrem em patamar. Quando existem diferenças significativas de altura entre os vários apoios, o vão equivalente toma a seguinte forma: (Checa, 1988; Labegalini et al., 1992)

$$\mathfrak{f} = \frac{\sum_i^n b_i}{\sum_i^n L_i} \sqrt{\frac{\sum_i^n \frac{L_i^5}{b_i^2}}{\sum_i^n L_i}} \quad (3.2-39)$$

Onde:

$$b_i = \sqrt{L_i^2 + h_i^2} \quad (3.2-40)$$

Sendo  $h_i$  a altura a que se encontra o apoio  $i$ .

O vão equivalente ou vão ideal de regulação, é fundamental na regulação mecânica da linha, i.e., no cálculo da tensão de montagem dos condutores e na tensão a verificar no estado atmosférico mais desfavorável para que esse valor não seja ultrapassado.

### 3.2.5. Acção dos Agentes Externos sobre as Linhas

As linhas estão expostas aos agentes atmosféricos, nomeadamente à temperatura, ao gelo e ao vento, como já foi referido. Nos subcapítulos que se seguem detalhar-se-á sobre cada um destes agentes.

#### 3.2.5.1. *Acção da Temperatura*

Os condutores estão submetidos a variações na temperatura que resultam de um equilíbrio entre o seu calor interno e o calor que transferem para o ar.

Os condutores aumentam a sua temperatura, maioritariamente, devido ao efeito de Joule, que resulta da corrente eléctrica que os atravessa, mas pode também resultar ao calor recebido da luz solar. A perda de calor pode ser feita por radiação, que depende da diferença de temperatura entre o condutor e o meio envolvente, ou por convecção que, dependendo da mesma diferença, depende também da velocidade do vento circundante. (Labegalini et al., 1992)

“Os cabos que as constituem possuem um elevado coeficiente de dilatação térmica, o que leva a que se verifique um aumento ou diminuição significativa do seu diâmetro conforme a variação de temperatura seja positiva ou negativa. Assim, de forma a controlar a variação das flechas dos condutores, o controlo da temperatura revela-se importantíssimo.” (Pedreira, 2013)<sup>5</sup>

A variação das flechas influencia inversamente o valor de tracção horizontal e, desta forma, a tracção varia com a temperatura.

O valor para a temperatura varia como está representado na

Tabela 3.2-1.

#### 3.2.5.2. *Acção do Gelo*

---

<sup>5</sup> Este autor parte de uma outra citação:

“H. Pohlmann and R. Thomas, "Sag increases resulting from conductor creep on medium voltage transmission lines, and the problem of measuring sag on live overhead lines," in *Electricity Distribution*, 1993. CIRED. 12th International Conference on, 1993, pp. 3.20/1-3.20/5 vol.3.”

Em determinadas regiões do país, infra explicitadas, nas estações do ano mais frias, como o Inverno, existe forte possibilidade de formação de uma manga de gelo que circunda o condutor. Com isto, existe um aumento do diâmetro do condutor bem como do seu peso e, por isso, é essencial considerar a manga de gelo no cálculo mecânico.

Segundo o art. 16.º da RSLEAT, nas zonas cuja altitude é superior a 700m consideram-se sujeitas à formação da manga de gelo. Ainda de acordo com este artigo, para efeitos de cálculo, a espessura de gelo considera-se uniforme, deverá ser de, no mínimo, 10 mm e com uma densidade de 0,9 kg/dm³ (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992).

### 3.2.5.3. Acção do Vento

Para o cálculo da força que o vento exerce sobre os condutores considera-se que este actua com direcção horizontal e que a força toma o mesmo sentido. Tomando-se então a seguinte expressão, segundo o art. 10.º do RSLEAT (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992):

$$F_v = \alpha \cdot c \cdot q \cdot s \quad [daN] \quad (3.2-41)$$

No cálculo, é mais relevante obter a força do vento em função do comprimento, tendo-se (D.G.E., 1986):

$$F_v = \frac{\alpha \cdot c \cdot q \cdot d \cdot 10^{-3}}{2} * 0.981 \quad [daN/m] \quad (3.2-42)$$

Onde:

$\alpha$  – Coeficiente de redução;

$c$  – coeficiente de forma;

$q$  – pressão dinâmica do vento [ $daN/mm^2$ ];

$s$  – superfície batida pelo vento [ $mm^2$ ].

$d$  – diâmetro do condutor [ $mm^2$ ].

O RSLEAT define os valores a aplicar para cada uma destas variáveis.

A pressão dinâmica do vento é obtida directamente a partir da sua velocidade e varia de acordo com a altura ao solo. De notar que, os valores são diferentes de acordo com o estado atmosférico em que se inserem, isto é, para o Inverno considera-se vento reduzido enquanto que, para a Primavera, se considera o

vento máximo habitual. Na Tabela 3.2-2 estão os valores de pressão dinâmica a considerar segundo o art. 13º do RSLEAT (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992).

Para regiões mais expostas, como a faixa costeira (até 5 km) e para zonas situadas a uma altitude superior a 700m, é recomendado considerar os valores da pressão dinâmica aumentados em 20% (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992).

**Tabela 3.2-2 - Pressão dinâmica do vento em função da altura ao solo.**

Pressão dinâmica do vento		
Altura acima do solo(m)	Pressão dinâmica - $q$ (Pa)	
	Vento máximo habitual	Vento reduzido
até 30m	750	300
de 30 a 50 m	900	360
acima de 50m	1050	420

O coeficiente de redução representa a variação da velocidade de actuação do vento ao longo de uma frente extensa e vale 0,6 para os condutores e 1 para os apoios, travessas e isoladores.

O coeficiente de forma permite incorporar o efeito que a geometria do elemento batido pelo vento tem sobre a força do vento. Os valores adoptados para o coeficiente de forma são os seguintes (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992):

**Tabela 3.2-3 - Valor para o coeficiente de forma para condutores, cabos e isoladores.**

	Diâmetro (mm)	Coeficiente de forma
Condutores nus e cabos de guarda	Até 12,5	1,2
	Acima de 12,5	-
	Até 15,8	1,1
	Acima de 15,8	1,0
Cabos isolados em feixe (torçada)		1,3
Cabos auto-suportados e cabos tipo 8		1,8
Isoladores		1,0

Para as restantes estruturas, o valor do coeficiente de forma varia entre 0,6 e 2,6, de acordo com a alínea b) do art. 15º do RSLEAT. (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

### *3.2.6. Coeficientes de Sobrecarga*

A linha está sujeita a esforços mecânicos contínuos devidos ao seu peso e a forças de natureza variável que resultam da acção do vento e do gelo. Na Figura 2.3.1-12 representam-se as forças típicas que podem ser solicitadas a um condutor.

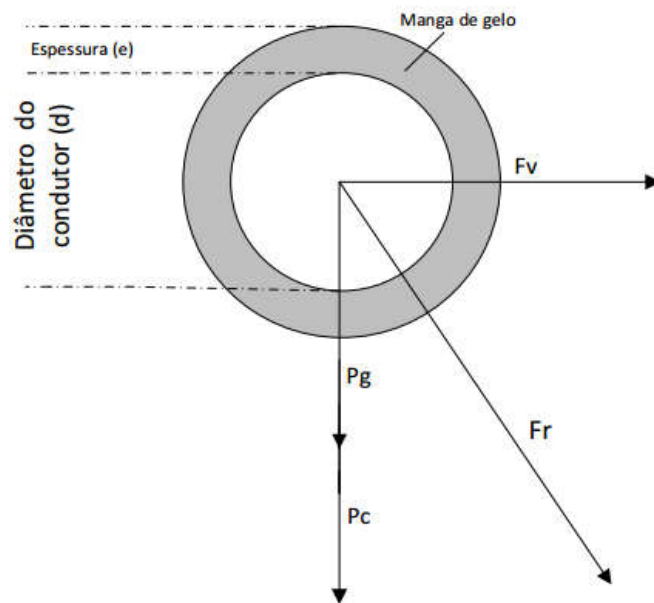


Figura 2.3.1-12 - Forças exercidas sobre um condutor.(Pedreira, 2013)

A terminologia utilizada na Figura 2.3.1-12 significa o seguinte:

- e – Espessura da manga de gelo;
- d – Diâmetro do condutor;
- $F_v$  – Força do vento;
- $P_c$  – Peso do condutor;
- $P_g$  – Peso da manga de gelo;
- $F_t$  – Força resultante.

Os coeficientes de sobrecarga pretendem incorporar na linha o efeito das acções variáveis a que estão sujeitos os condutores e são obtidos através da razão entre o valor da força resultante e as forças de origem permanente, isto é, o peso do condutor:(Madureira, 2009; Silva, 2014)

$$m = \frac{F_t}{P_c} \quad (3.2-43)$$

A força resultante é dada por:

$$F_t = \sqrt{(P_c + P_g)^2 + F_v^2} \quad [daN/m] \quad (3.2-44)$$

O peso do condutor depende do material que o compõe, nomeadamente do peso próprio desse material, bem como da sua secção. Equacionando, tem-se:

$$P_c = \omega_c \times \sigma \quad [daN/m] \quad (3.2-45)$$

Onde:

$\omega_c$  - peso próprio do material constituinte do condutor [ $daN/mm^2$ ]

$\sigma$  - secção do condutor [ $mm^2$ ]

O peso da manga de gelo é obtido da seguinte forma: (Sequeira, 2009)

$$P_g = \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2] \quad [daN/m] \quad (3.2-46)$$

Tendo que:

$\omega_g$  - Peso específico do gelo [ $daN/mm^2$ ]

$d$  - diâmetro do condutor [ $mm^2$ ]

$e$  - espessura da manga de gelo [ $mm^2$ ]

Agregando as equações (3.2-43) e (3.2-44) obtém-se:

$$m = \frac{\sqrt{(P_c + P_g)^2 + F_v^2}}{P_c} \quad (3.2-47)$$

Assim, como foi definido para o estado de Verão, considera-se ausência de vento e de manga de gelo. Esta ausência de sobrecargas atmosféricas, para este estado, traduz-se num coeficiente de sobrecarga unitário. Este facto é facilmente comprovado na equação que se segue.

$$m = \frac{\sqrt{(P_c + 0)^2 + 0^2}}{P_c} = \frac{\sqrt{P_c^2}}{P_c} = 1 \quad (3.2-48)$$

### 3.2.7. Equação de Mudança de Estado

A equação de estados, ou equação de mudança de estado, permite calcular a variação na tracção do condutor entre dois estados diferentes, isto é, para dois valores de sobrecarga diferentes e para dois valores diferentes de temperatura.

A sua formulação parte do valor do comprimento da catenária, estudado nos subcapítulos anteriores, para os dois estados. Então, a diferença entre o comprimento da catenária para os dois estados ( $L_2 - L_1$ ) depende da variação dos valores para a temperatura ( $\theta_2 - \theta_1$ ) e para a tracção ( $t_2 - t_1$ ). Depende ainda do coeficiente de dilatação linear ( $\alpha$ ) bem como do módulo de elasticidade ( $E$ ), características que variam de acordo com o condutor em estudo. Parte-se ainda do pressuposto que as deformações são elásticas, aplicando-se deste modo a lei de Hook. (Checa, 1988)

A expressão final para a equação de estados mais utilizada é dada por: (F. Gonçalves, 2011)<sup>6</sup>

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha \times E} - \frac{m_i^2 \times \omega^2 \times L^2}{24 \alpha \times \sigma^2 \times t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha \times E} - \frac{m_k^2 \times \omega^2 \times L^2}{24 \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} \quad (3.2-49)$$

Onde:

$\theta_i, \theta_k$  – Temperatura dos estados atmosféricos.

$t_i, t_k$  – Tracções aplicadas aos condutores para os diferentes estados.

$\sigma$  – secção do condutor [ $mm^2$ ]

$E$  – Módulo de elasticidade [ $daN.mm^{-2}$ ]

$\alpha$  – Coeficiente de dilatação térmica [ $^{\circ}C^{-1}$ ]

$\omega$  – Peso específico linear do condutor [ $daN.m^{-1}$ ]

$m_i, m_k$  – Coeficientes de sobrecarga dos respectivos estados.

$L$  – Comprimento do vão [ $m$ ]

---

<sup>6</sup> Este autor parte da seguinte citação:

Teixeira, C. (2006). *SEE I*. Apontamentos da disciplina de Sistemas Eléctricos de Energia I, Licenciatura em Engenharia Electrotécnica, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.



Como a equação de estados é uma equação não linear, a sua solução é calculada recorrendo a processos iterativos. Escolheu-se, para este trabalho, o método Newton-Raphson por ser amplamente utilizado para encontrar raízes de equações não lineares. Este método aproxima a função, a cada iteração, pela sua derivada e a intersecção desta com o eixo das abcissas.

Desta forma, partindo de um valor conhecido  $x_0$ , é calculado o valor de  $f(x_0)$  bem como de  $f'(x_0)$  e o valor de  $x$  para a iteração seguinte é calculado respeitando o seguinte:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.2-50)$$

A rapidez da convergência depende do valor inicial escolhido, por isso deve ser escolhido um valor próximo daquele esperado.

Neste caso,  $x_n$  representa a tensão que se pretende calcular. Com este método, aliado à equação de estados, é possível obter a tensão de montagem dos condutores para diferentes temperaturas.

### 3.2.8. Vão Crítico

O vão crítico,  $L_{cr}$ , corresponde ao vão para o qual os condutores ficam sujeitos à tracção máxima, definida previamente, quer no estado de Inverno quer de Primavera. Este valor permite apurar sobre o estado atmosférico que será mais desfavorável e calcula-se do seguinte modo: (Checa, 1988)

$$L_{cr} = \frac{t_{max}}{\omega} \frac{\sqrt{24 \alpha \times (\theta_1 - \theta_2)}}{m_1^2 - m_2^2} \quad (3.2-51)$$

Esta expressão deriva directamente a equação dos estados, desenvolvendo a equação para cada um dos estados (Inverno e Primavera) e igualando as tensões de cada estado à tensão máxima.

### 3.2.9. Estado Atmosférico mais Desfavorável

É fundamental saber qual o estado atmosférico mais desfavorável pois é neste estado que será atingida a tracção mais elevada devendo-se, por isso, condicionar que esta seja inferior à tracção máxima estipulada. Com esta informação é, então, possível determinar a tensão de montagem para qualquer estado e temperatura com a garantia de que a tracção máxima não será ultrapassada.

De acordo com a árvore de decisão seguinte, é possível determinar o estado atmosférico mais adverso. Nesta árvore, a temperatura e o coeficiente com o algarismo 1 representam o estado de Inverno ao passo que o algarismo 2 representa a Primavera. (Leite, 2008)

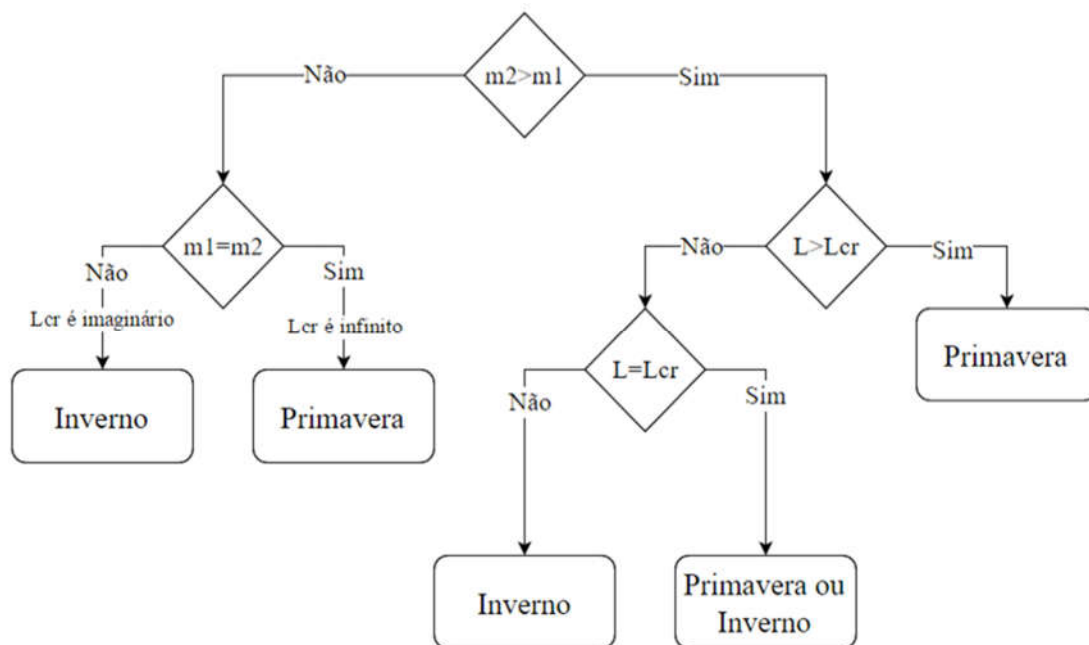


Figura 2.3.1-13 - Árvore de decisão do estado atmosférico mais desfavorável.

### 3.2.10. Distâncias Mínimas Regulamentares

Os condutores deverão ser estabelecidos de forma a proteger as pessoas, de modo a que sejam inatingíveis por estas, sem meios especiais. O RSLEAT prevê as várias distâncias a garantir: distância dos condutores ao solo, às árvores, aos edifícios, à distância entre condutores, entre outros.

É considerada a flecha do estado de Verão por ser, como se viu, a situação de flecha máxima, permitindo salvaguardar os outros estados. Assim, a altura dos apoios deverá ser dimensionada por forma a garantir todas as distâncias impostas pelo RSLEAT e que se irão apresentar de seguida.

#### 3.2.10.1. Distância dos Condutores ao Solo

O art. 27.º da RSLEAT define que, na condição de flecha máxima, a distância entre os condutores e o solo, desviados ou não pelo vento, não deverá ser inferior ao resultado da seguinte expressão: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

$$D = 6 + 0,005U \quad (3.2-52)$$

Onde U, em kV, é a tensão nominal da linha.

#### 3.2.10.2. Distância dos Condutores às Árvores

A expressão que determina a distância mínima que se deve verificar entre os condutores e as árvores é dada pelo art. 28.º/1 do RSLEAT, para a condição de flecha máxima: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

$$D = 2 + 0,0075U \quad (3.2-53)$$

Onde U, em kV, representa a tensão nominal da linha.

A distância D, na equação (3.2-53), não deverá ser inferior a 2,5 metros. (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

O número 2 do mesmo artigo impõe a existência de uma faixa de serviço com uma largura de 5 metros, dividida ao meio pela linha, onde será feito o corte e decote de árvores necessários para possibilitar a sua montagem e manutenção.

Esta faixa pode ser alargada para efeitos de segurança, para que se possa respeitar a distância calculada na expressão (3.2-53) e deverá ainda ser efectuado o corte de árvores cuja queda possa garantir uma distância de 1,5 metros em relação aos condutores.

#### 3.2.10.3. *Distância dos Condutores aos Edifícios*

De acordo com o art. 29.º/1 do RSLEAT, na proximidade de edifícios, excepto os que se encontram exclusivamente ao serviço de exploração de instalações eléctricas, as linhas deverão ser estabelecidas respeitando o seguinte: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992):

- A. Em relação a partes salientes que possam facilmente ser escaladas por pessoas, como chaminés e outras coberturas, os condutores nus, desviados ou não pelo vento, deverão estar, no mínimo, à distância dada pela expressão:

$$D = 3 + 0,0075U \quad (3.2-54)$$

Tendo que U é a tensão nominal da linha, em kV. D não deverá ser inferior a 4 metros.

- B. Se o condutor, se situar ao lado do edifício, a um nível igual ou inferior à altura das paredes mais próximas, não deverão ficar a uma distância inferior à calculada na expressão (3.2-54). (D.S.E.E, 1993) (D.S.E.E, 1993)

#### 3.2.10.4. *Distância dos Condutores a Obstáculos Diversos*

Em zonas em que se encontrem obstáculos que não sejam, em situações normais, acessíveis por pessoas, como falésias, terrenos com declive muito inclinado, construções ou partes salientes de edifícios, se estas saliências atingirem uma al-

tura, acima do solo, superior a 3 metros, os condutores deverão manter, no mínimo, a distância dada pela seguinte expressão, de acordo com o art. 30º (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992):

$$D = 2 + 0,0075U \quad (3.2-55)$$

U corresponde à tensão nominal da linha, em kV. De notar que D, na equação (3.2-55), não pode ser inferior a 3m.

#### 3.2.10.5. *Distância entre Condutores*

O art. 30º estabelece que a aproximação dos condutores, devido às oscilações provocadas pelo vento, para as linhas de 2ª classe, não deverá ser inferior à dada pela seguinte expressão:(Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

$$D = 0,75k\sqrt{f + d} + \frac{U}{200} \quad (3.2-56)$$

Onde:

$f$  – Flecha máxima do condutor [m]

$d$  – Comprimento das cadeias de isoladores [m]

$U$  – Tensão nominal da linha [kV]

$k$  – Coeficiente que depende da natureza do condutor: 0,6 para condutores de cobre, bronze, aço e alumínio-aço; 0,7 para condutores alumínio e de ligas de alumínio.

A distância D, dada pela equação (3.2-56), não pode ser inferior 0,45 metros.

Nas zonas de gelo existe perigo de oscilação vertical das linhas no momento de queda de gelo, havendo maior propensão para uma aproximação perigosa entre os condutores. Pode ainda, a queda parcial de gelo de um condutor provocar a assimetria de cargas de gelo acumuladas, resultando numa inclinação das cadeias de isoladores que provoca uma diminuição local das distâncias entre eles.

A distância poderá ser inferior à dada pela equação(3.2-56) fora das zonas de gelo desde que a distância entre os planos horizontais que passam pelos pontos de fixação não seja menor que dois terços daquele valor (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992).

### 3.2.10.6. *Distância entre Condutores e Apoios*

A distância mínima entre condutores e apoios é diferente para duas situações distintas, segundo o art. 33.º (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992):

- A. Caso os condutores se encontrem em repouso, sem acção do vento, à temperatura mais desfavorável. Para este caso, tem especial importância quando são usadas cadeias de suspensão em ângulos de traçado da linha pois a inclinação da cadeia varia com a temperatura. Nesta situação, aplica-se a seguinte expressão:

$$D = 0,1 + 0,0065U \quad (3.2-57)$$

- B. Caso os condutores estejam desviados sob a acção do vento, à temperatura de 15°C (Estado de Primavera), a distância mínima a garantir é dada por:

$$D = 0.0065U \quad (3.2-58)$$

Onde, para ambas as equações, U representa a tensão nominal da linha, em kV.

Este artigo impõe ainda que a distância não deverá ser, em caso algum, inferior a 0,15 metros excepto na zona de fixação dos condutores nus aos isoladores rígidos, exigindo-se que, nesses casos, a distância ao apoio seja superior à distância disruptiva do elemento isolante. Para tal, as características dos isoladores utilizados devem respeitar as normas, de acordo com a tensão nominal.

### 3.2.10.7. *Travessias Aéreas*

No projecto de linhas aéreas de alta tensão, é necessário ter em consideração, ao longo do traçado, a distância a garantir nos seguintes cruzamentos ou travessias:

- Travessias de auto-estradas e estradas nacionais ou municipais;
- Travessias de teleféricos;

- Travessias de caminhos de ferro;
- Travessias de cursos de água(navegáveis ou não);
- Cruzamento de linhas de energia.

As distâncias mínimas a verificar, bem como as diversas condicionantes específicas de cada caso, encontram-se regulamentadas no RSLEAT entre o art. 91.º e o art. 114.º.

De notar que, no cruzamento de linhas de energia, estipula-se que as linhas de maior tensão deverão estar colocadas acima das linhas de menor tensão salvo casos excepcionais em que tal operação induza dificuldades técnicas e aumente significativamente os custos.

### 3.2.11. Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores em Suspensão

Como já se referiu anteriormente, é prática comum utilizar cadeias de suspensão em apoios de alinhamento. Este tipo de fixação permite que haja alguma mobilidade por parte da cadeia, o que obriga a verificar que, desta mobilidade, não resulta uma aproximação perigosa entre a cadeia e o apoio.

O isolador está sujeito a duas forças principais: à força do seu próprio peso e do peso dos condutores e à força do vento sobre ele e sobre os condutores. O seu movimento transversal deve-se, principalmente, à força exercida pelo vento.

Na figura seguinte, representa-se o conjunto de forças exercidas sobre a cadeia:

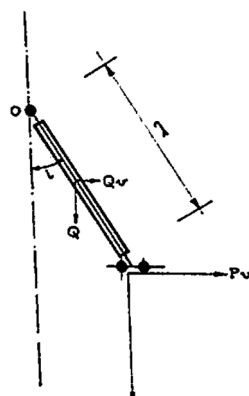


Figura 2.3.1-14 - Conjunto de forças exercidas sobre uma cadeia de suspensão, em equilíbrio, submetida à acção do vento.(Checa, 1988)

A terminologia, usada na Figura 2.3.1-14, tem o seguinte significado:

$P_v$  – Força do vento sobre os condutores [ $daN$ ]

$Q_v$  – Força do vento sobre a cadeia de isoladores [ $daN$ ]

$\lambda$  – Comprimento da cadeia de isoladores [ $m$ ]

$P$  – Peso dos condutores [ $daN$ ]

$Q$  – Peso da cadeia de isoladores [ $daN$ ]

$i$  – Desvio transversal da cadeia de isoladores [ $grados$ ]

Analisando a Figura 2.3.1-14 verifica-se que as forças  $Q$  e  $Q_v$  são aplicadas no ponto médio da cadeia. Utilizando o conceito de momento angular, é possível deslocar estas forças para o extremo da cadeia, dividindo-as por 2, para que se possa, então, obter o valor do desvio em função dos esforços concorrentes: (Checa, 1988)

$$\tan i = \frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \quad (3.2-59)$$

Assim, facilmente se constata que, na ausência de vento, isto é, para  $P_v = 0 \wedge Q_v = 0$ , as cadeias de isoladores encontram-se na posição vertical pois  $i = 0$ .

### 3.2.12. Estabilidade dos Apoios

O estudo da estabilidade dos apoios tem como finalidade averiguar qual o apoio mais apropriado de acordo com a sua função na linha e ainda de acordo com as solicitações mecânicas a que está sujeito. Genericamente, o apoio está sujeito aos seguintes esforços:

- Tracções mecânicas exercidas pelos condutores das linhas principais e derivadas;
- Peso do próprio apoio, e dos restantes elementos constituintes da linha incluindo os condutores dos semi-vãos adjacentes e das linhas derivadas;



- Força exercida pelo vento sobre o apoio e restantes elementos da linha incluindo os condutores dos meios vãos adjacentes e das linhas derivadas.

De seguida, de acordo com o que está tipificado no RSLEAT, serão analisadas as solicitações sobre os apoios de acordo com sua função na linha.

Importa salientar que, os esforços a que os apoios estão sujeitos dividem-se em três principais componentes, e cuja nomenclatura será mantida ao longo nos tópicos que se seguem:

$F_y$  – Solicitação transversal.

$F_x$  – Solicitação longitudinal.

$F_z$  – Solicitação vertical.

Importa ainda referir que, será usada a força do vento sobre os condutores em daN/m para que se possa calcular a força exercida pelo vento em função do comprimento dos meios vãos adjacentes. É usada a variável  $w'$  que corresponde a metade do peso unitário. Tem-se então:

$$w' = \frac{w_0}{2} \quad [daN/m] \quad (3.2-60)$$

Nos cálculos seguintes incorre-se nalgumas simplificações:

- Consideram-se os vãos em patamar;
- Despreza-se o vento sobre armações e isoladores;
- Despreza-se o peso das armações.

Nas equações utilizadas são utilizados os índices 1 e 2 para diferenciar as equações relativas à hipótese 1 e 2, respectivamente.

#### 3.2.12.1. *Apoios de Alinhamento e Ângulo*

Os apoios de alinhamento e ângulo são calculados, de acordo com o estabelecido no art. 56.º e 57.º do RSLEAT, para duas hipóteses distintas consideradas não simultaneamente: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

Hipótese 1: Considera-se a força exercida pelo o vento a actuar, segundo a direcção da bissectriz do ângulo, sobre o apoio, armações, isoladores e ainda sobre os condutores nos dois meios vãos adjacentes ao apoio. Como o apoio está em ângulo, esta força será decomposta nas componentes transversal e longitudinal.

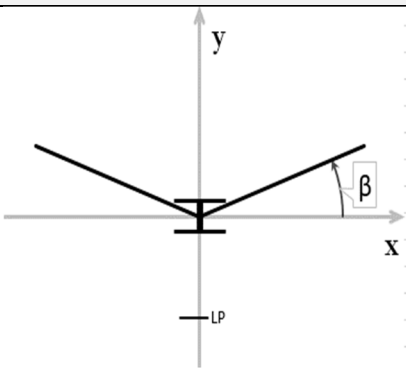
Simultaneamente, a força resultante das tracções dos condutores (que também se divide nas componentes transversal e longitudinal) e, ainda, como esforço vertical, o peso próprio de todos os elementos das linhas.

Hipótese 2: Para esta hipótese considera-se o esforço longitudinal igual a um quinto do esforço do vento segundo a direcção da bissectriz do ângulo sobre os condutores nos meios vãos adjacentes, calculado na hipótese anterior, actuando com direcção normal à bissectriz linha.

Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior.

Apresenta-se, na tabela seguinte, a informação contida nas hipóteses acima referidas dividida nas respectivas componentes tridimensionais: Componente vertical, longitudinal e transversal.

**Tabela 3.2-4 -Apoio de ângulo - Síntese de solicitações aplicadas de acordo com as duas hipóteses, consideradas não simultaneamente. Art. 56.º e 57.º do RSLEAT.**

Hipótese 1	Hipótese 2	Função
$F_y^1 = 3[\cos^2(\beta) \times (\omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_2) + (t_1 + t_2) \times \sin(\beta)]$	$F_y^2 = 0$	
$F_x^1 = \cos(\beta) \times  \sigma \cdot t_1 - \sigma \cdot t_2 $	$F_x^2 = \frac{1}{5} \times 3 \cos^2(\beta) \times (\omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_2)$	
$F_z^1 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2) + P_{isol}$	$F_z^2 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2) + P_{isol}$	

O especificado anteriormente é simplificado para a situação de alinhamento pois o ângulo  $\beta$  é igual a zero.

#### 3.2.12.2. *Apoios de Derivação*

Os apoios de derivação são calculados, de acordo com o estabelecido no art. 58.º do RSLEAT, para duas hipóteses distintas consideradas não simultaneamente: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

Hipótese 1: Considera-se a força exercida pelo o vento a actuar normalmente à direcção da linha principal se o apoio for de alinhamento ou segundo a direcção da bissectriz do ângulo da linha principal se o apoio for de ângulo. Esta sobrecarga actua sobre o apoio, armações, isoladores e ainda sobre os condutores nos dois meios vãos adjacentes ao apoio e, sobre os condutores no meio vão adjacente das linhas derivadas.

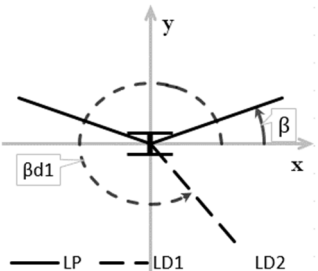
Simultaneamente, a força resultante das componentes horizontais tracções dos condutores das linhas principais e das linhas derivadas e, ainda, como esforço vertical, o peso próprio de todos os elementos das linhas.

Hipótese 2: Para esta hipótese considera-se o esforço o esforço do vento actuando na direcção da linha principal se o apoio for de alinhamento ou segundo a normal à bissectriz do ângulo da linha principal se o apoio for de ângulo. Esta sobrecarga actua sobre os condutores da linha principal nos meios vãos adjacentes e sobre os condutores do meio vão adjacente das linhas derivadas.

Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior.

Apresenta-se, na tabela seguinte, a informação contida nas hipóteses acima referidas dividida nas respectivas componentes tridimensionais: Componente vertical, longitudinal e transversal.

**Tabela 3.2-5 -Apoio de derivação- Síntese de solicitações aplicadas de acordo com as duas hipóteses, consideradas não simultaneamente. Art. 58.º do RSLEAT.**

Hipótese 1	Hipótese 2
$F_y^1 = 3[\cos^2(\beta) \times (\omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_2) +  (t_1 + t_2) \cdot \sin(\beta) + t_d \cdot \sin(\beta)  + \cos^2(\beta_d) \times \omega_d \cdot L_d]$	$F_y^2 = 3 \sin(\beta) (\sigma \cdot t_1 - \sigma \cdot t_2) + t_d \cdot \sin(\beta_d) $
$F_x^1 = 3 \times  \cos(\beta) (\sigma \cdot t_1 - \sigma \cdot t_2) + t_d \cdot \cos(\beta_d) $	$F_x^2 = 3[\sin^2(\beta) \times (\omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_2) +  t_d \cdot \cos(\beta_d)  + \sin^2(\beta_d) \times \omega_d \cdot L_d]$
$F_z^1 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2 + w'_d \cdot L_d) + P_{isol}$	$F_z^2 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2 + w'_d \cdot L_d) + P_{isol}$
Função	
	

A tabela anterior pode ser aplicada quer para apoios de derivação em ângulo quer para apoios em alinhamento basta, para o segundo caso, utilizar  $\beta = 0$ .

### 3.2.12.3. Apoios de Reforço em Alinhamento

Os apoios de reforço em alinhamento são calculados, de acordo com o estabelecido no art. 59.º do RSLEAT, para as hipóteses seguintes consideradas não simultaneamente: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

Hipótese 1: Como esforço transversal, tem-se a força exercida pelo o vento a actuar, com direcção normal à linha, sobre o apoio, armações, isoladores e ainda sobre os condutores nos dois meios vãos adjacentes ao apoio.

Simultaneamente, como esforço vertical, o peso próprio de todos os elementos da linha.

Hipótese 2: Como esforço longitudinal, considera-se dois terços da soma das componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores.

Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior.

Acções excepcionais:

Hipótese 3: Como esforço longitudinal, considera-se a soma das componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores, na condição de rotura de qualquer um dos condutores.

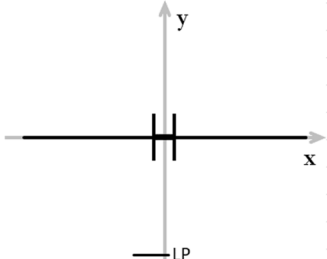
Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior

Segundo o número três do mesmo artigo, o cálculo da acção excepcional (hipótese 3) não é necessário para linhas de 2ª classe.

Apresenta-se, na tabela seguinte, a informação contida nas hipóteses acima referidas dividida nas respectivas componentes tridimensionais: Componente vertical, longitudinal e transversal.

**Tabela 3.2-6 -Apoio de reforço em alinhamento - Síntese de solicitações aplicadas de acordo com as duas hipóteses, consideradas não simultaneamente. Art. 59.º do RSLEAT.**

Hipótese 1	Hipótese 2	Função
$F_y^1 = 3 \times (\omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_2)$	$F_y^2 = 0$	

$F_x^1 = 0$	$F_x^2 = (t_1 + t_2)$	
$F_z^1 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2) + P_{isol}$	$F_z^2 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2) + P_{isol}$	

#### 3.2.12.4. Apoios de Reforço em Ângulo

Os apoios de reforço em ângulo são calculados, de acordo com o estabelecido no art. 60.º do RSLEAT, para as hipóteses seguintes consideradas não simultaneamente: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

Hipótese 1: Considera-se a força exercida pelo o vento a actuar, segundo a direcção da bissectriz do ângulo, sobre o apoio, armações, isoladores e ainda sobre os condutores nos dois meios vãos adjacentes ao apoio.

Simultaneamente, a força resultante das componentes horizontais das tracções dos condutores e, ainda, como esforço vertical, o peso próprio de todos os elementos das linhas.

Hipótese 2: Para esta hipótese, considera-se o esforço longitudinal igual a dois terços das tracções máximas exercidas pelos condutores nos meios vãos adjacentes.

Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior.

Acção excepcional:

Hipótese 3: Como esforço longitudinal, considera-se a soma das componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores, na condição de rotura de qualquer um dos condutores.

Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior.

De acordo com o número dois do mesmo artigo, o cálculo da acção excepcional (hipótese 3) não é necessário para linhas de 2ª classe.

Apresenta-se, na tabela seguinte, a informação contida nas hipóteses acima referidas dividida nas respectivas componentes tridimensionais: Componente vertical, longitudinal e transversal.

**Tabela 3.2-7 - Apoio de reforço em ângulo - Síntese de solicitações aplicadas de acordo com as duas hipóteses, consideradas não simultaneamente. Art. 60.º do RSLEAT.**

Hipótese 1	Hipótese 2	Função
$F_y^1 = 3[\cos^2(\beta) \times (\omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_2) + (t_1 + t_2) \times \sin(\beta)]$	$F_y^2 = 0$	
$F_x^1 = 3 \times \cos(\beta) \times  \sigma \cdot t_1 - \sigma \cdot t_2 $	$F_x^2 = (t_1 + t_2)$	
$F_z^1 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2) + P_{isol}$	$F_z^2 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2) + P_{isol}$	

#### 3.2.12.5. Apoios de Reforço em Derivação

Os apoios de reforço derivação são calculados, de acordo com o estabelecido no art. 61.º do RSLEAT, para as hipóteses seguintes consideradas não simultaneamente: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

Hipótese 1: Considera-se a força exercida pelo o vento a actuar normalmente à direcção da linha principal se o apoio for de alinhamento ou segundo a direcção da bissectriz do ângulo da linha principal se o apoio for de ângulo. Esta sobrecarga actua sobre o apoio, armações, isoladores e ainda sobre os condutores nos dois meios vãos adjacentes ao apoio e, sobre os condutores no meio vão adjacente das linhas derivadas.

Simultaneamente, a força resultante das componentes horizontais tracções dos condutores das linhas principais e das linhas derivadas e, ainda, como esforço vertical, o peso próprio de todos os elementos das linhas.

Hipótese 2: Para esta hipótese considera-se a força horizontal, igual a dois terços da soma das componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores das linhas principais, na direcção da linha principal se o apoio for de alinhamento ou segundo a normal à bissectriz do ângulo da linha principal se o apoio for de ângulo. Esta sobrecarga actua sobre os condutores da linha principal nos meios vãos adjacentes e sobre os condutores do meio vão adjacente das linhas derivadas.

Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior.

Acção excepcional:

Hipótese 3: Como esforço longitudinal, considera-se a soma das componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores, na condição de rotura de qualquer um dos condutores.

Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior.

Apresenta-se, na tabela seguinte, a informação contida nas hipóteses acima referidas dividida nas respectivas componentes tridimensionais: Componente vertical, longitudinal e transversal.

**Tabela 3.2-8 -Apoio de reforço em derivação- Síntese de solicitações aplicadas de acordo com as duas hipóteses, consideradas não simultaneamente. Art. 61.º do RSLEAT.**

Hipótese 1	Hipótese 2
$F_y^1 = 3[\cos^2(\beta) \times (\omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_2) +  (t_1 + t_2) \cdot \sin(\beta) + t_d \cdot \sin(\beta)  + \cos^2(\beta_d) \times \omega_d \cdot L_d]$	$F_y^2 = 3 \sin(\beta) (\sigma \cdot t_1 - \sigma \cdot t_2) + t_d \cdot \sin(\beta_d) $



$F_x^1 = 3 \times  \cos(\beta) (\sigma \cdot t_1 - \sigma \cdot t_2) + t_d \cdot \cos(\beta_d) $	$F_x^2 = (t_1 + t_2) + 3 t_d \cdot \cos(\beta_d) $
$F_z^1 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2 + w'_d \cdot L_d) + P_{isol}$	$F_z^2 = 3 \times (w' \cdot L_1 + w' \cdot L_2 + w'_d \cdot L_d) + P_{isol}$
Função	

A tabela anterior pode ser aplicada quer para apoios de derivação em ângulo quer para apoios em alinhamento basta, para o segundo caso, utilizar  $\beta = 0$ .

#### 3.2.12.6. Apoios de Fim de Linha

Os apoios de fim de linha são calculados, de acordo com o estabelecido no art. 62.º do RSLEAT, para duas hipóteses distintas consideradas não simultaneamente: (Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, 1992)

Hipótese 1: Como esforço transversal, tem-se a força exercida pelo o vento a actuar, com direcção normal à linha, sobre o apoio, armações, isoladores e ainda sobre os condutores no meio vão adjacente ao apoio.

Simultaneamente, na componente longitudinal, a força resultante das tracções dos condutores e ainda, como esforço vertical, o peso próprio de todos os elementos das linhas.

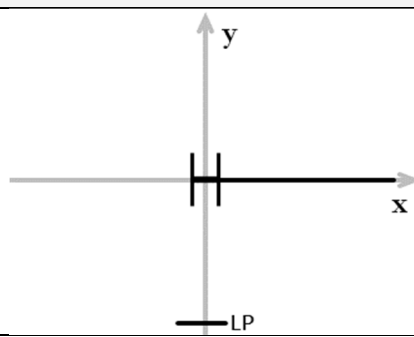
Acções excepcionais:

Hipótese 2: Como esforço longitudinal, considera-se a soma das componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores, na condição de rotura de qualquer um dos condutores.

Simultaneamente, considera-se a componente vertical com o mesmo valor que na hipótese anterior.

Apresenta-se, na tabela seguinte, a informação contida nas hipóteses dividida nas respectivas componentes tridimensionais: Componente vertical, longitudinal e transversal.

**Tabela 3.2-9 -Apoio de fim de linha - Síntese de solicitações aplicadas de acordo com as duas hipóteses, consideradas não simultaneamente. Art. 62.º do RSLEAT.**

Hipótese 1	Função
$F_y^1 = 3 \times (\omega \cdot L_1)$	
$F_x^1 = 3  \sigma \cdot t_1 $	
$F_z^1 = 3 \times (w' \cdot L_1) + P_{isol}$	

### 3.2.12.7. Deslocar Forças para o Topo do Poste

Como já foi dito, a disposição dos condutores depende da armação utilizada. Assim, as forças que actuam sobre cada condutor podem não ser aplicadas ao mesmo nível que as forças aplicadas aos restantes condutores.

De forma a poder calcular as forças resultantes nas situações anteriores é necessário colocar todos os esforços no mesmo ponto do apoio. Tipicamente, são colocados ao nível da primeira furação do apoio (para os postes de betão). O deslocamento destes esforços consiste em afectar o módulo da força com um braço que corresponde à distância ao topo do poste.

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{F_i \times h_i}{h_1 - 0,25} \quad (3.2-61)$$

Onde n corresponde ao número total de forças que actuam sobre aquele eixo e h representa a altura a que se encontra aplicada a força.

Tal como se pode ver na figura,  $h_1$  corresponde à altura do apoio. Assim, como a primeira furação do apoio se encontra a 0,25 metros da cabeça do apoio, deve ser feito o cálculo segundo os eixos x e y para que se possa obter a força resultante à altura  $h_1 - 0,25$ .

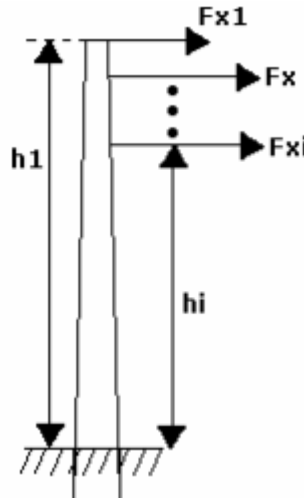


Figura 2.3.1-15 - Redução dos esforços sobre o apoio, segundo o eixo x, à altura da primeira furação. (N. A. L. V. Gonçalves, 2004)

#### 3.2.12.8. Selecção do Apoio

Dispondo dos esforços resultantes obtidos para cada eixo, exige-se agora a escolha de um apoio que seja capaz de os suportar.

Esta verificação faz-se somando os esforços relativos segundo cada um dos eixos. Esta soma deve ser inferior a um.

$$\frac{F_x}{F_{x\_apoio}} + \frac{F_y}{F_{y\_apoio}} < 1 \quad (3.2-62)$$

O esforço vertical, como solicita o apoio à compressão, só excepcionalmente poderá ser uma limitação mas a sua verificação faz-se da seguinte forma:

$$\frac{F_z}{F_{z\_apoio}} < 1 \quad (3.2-63)$$

Os índices  $F_{k\_apoio}$  correspondem às solicitações nominais estipuladas pelo fabricante para cada tipo de apoio segundo o eixo k.



### 3.3. *Cálculo Eléctrico*

O cálculo eléctrico tem como principais objectivos determinar a tensão nominal de transporte e a secção transversal dos condutores que a constituem. Este cálculo permite também determinar os vários parâmetros eléctricos das linhas bem como as quedas de tensão e as perdas de energias.

Actualmente, a tensão nominal da linha e a secção do condutor a utilizar são determinadas pelo operador da rede de distribuição e, como facilmente se pode averiguar, a corrente de serviço e as quedas de tensão são muito reduzidas para a capacidade suportada pelo condutor, pelo que este cálculo é muitas vezes desprezado. (Cruz, 2010)

#### 3.3.1. *Tensão de Transporte*

As tensões para linhas de Média Tensão, em Portugal, estão normalizadas, podendo ser de 15kV ou 30kV. A sua escolha resulta, principalmente, da tensão da instalação a alimentar.

A escolha da tensão de transporte também se prende com a minimização dos custos. Ora, para uma maior tensão nominal, menor será a secção se se mantiver o valor das perdas de energia. Reduzindo a secção, economiza-se no condutor e, devido ao menor peso consequente dessa redução, diminuem os esforços nos apoios ou podem existir vãos maiores. Por outro lado, o aumento da tensão faz aumentar o custo dos isoladores a aplicar. Em termos de minimização de custos, deverá existir um equilíbrio que, normalmente, recai sobre a tensão normalizada mais próxima. (Sequeira, 2009)

#### 3.3.2. *Constantes Físicas*

As linhas de distribuição de energia apresentam características lineares que se representam através de várias constantes físicas por unidade de comprimento.

### 3.3.2.1. Resistência Elétrica

A resistência de um condutor é dada por: (Checa, 1988)

$$R = \frac{\rho \times l}{\sigma} \quad [\Omega] \quad (3.3-1)$$

Onde:

$\rho$  – Resistividade do condutor à temperatura  $\theta$  [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ]

$l$  – Comprimento do condutor [km]

$\sigma$  – Secção do condutor [ $\text{mm}^2$ ]

Assim, a resistência por unidade de comprimento, i.e., por quilómetro, é dada por:

$$R_k = \frac{R}{l} = \frac{\rho}{\sigma} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (3.3-2)$$

### 3.3.2.2. Coeficiente de Auto-indução

O coeficiente de auto-indução, por unidade de comprimento, é dado pela seguinte expressão: (Checa, 1988)

$$L_k = \left[ \frac{\mu}{2n} + 4,6 \log \left( \frac{D}{r'} \right) \right] \times 10^{-4} \quad [\text{H}/\text{km}] \quad (3.3-3)$$

Onde:

$\mu$  – Permeabilidade relativa do condutor (tem valor 1 para o cobre, alumínio e alumino-aço; vale 200 para aço galvanizado);

$n$  – Número de condutores por feixe;

$D$  – Distância equivalente entre condutores;

$r'$  – raio fictício, em mm, definido por:

$$r' = \sqrt[n]{nrR^{n-1}} \text{ onde:}$$

$r$  – Raio do condutor [mm];

$R$  – Raio da circunferência que passa pelos condutores que formam a fase [mm].

A distância equivalente entre fases depende, naturalmente, da distância entre as respectivas fases. Efectuando a respectiva média geométrica, tem-se:

$$D = \sqrt[3]{D_{1-2} \cdot D_{1-3} \cdot D_{2-3}} \quad (3.3-4)$$

### 3.3.2.3. Capacidade

Para avaliar a capacidade entre condutores, num determinado meio com uma permissividade característica, é necessário obter a tensão entre os condutores e a intensidade do campo eléctrico que os rodeia. (Leonard L Grigsby, 2006)

Assim, a capacidade linear de um condutor, é a relação entre a carga electrostática, por unidade de comprimento, e a diferença de potencial, a cada instante, entre o condutor e o seu invólucro(terra), quando os condutores são sujeitos a um sistema polifásico de diferenças de potencial em relação a esse invólucro. (Sequeira, 2009)<sup>7</sup>

Para uma linha trifásica, resulta:(Checa, 1988)

$$C_k = \frac{24,2}{\log\left(\frac{D}{r'}\right)} \times 10^{-9} \text{ [F/km]} \quad (3.3-5)$$

A notação é equivalente à exposta anteriormente.

### 3.3.2.4. Condutância

Se o isolamento das linhas fosse perfeito, não existiria condutância pois não haveria qualquer corrente entre os condutores e os apoios nem superficialmente através desse isolamento. Estas correntes residuais circulam pela superfície do isolador ou através das suas massas, dando origem a perdas de energia que seriam nulas se o isolamento fosse perfeito (Checa, 1988)

Como essa corrente está presente, a resistência de isolamento pode ser definida segundo a lei de Ohm. A condutância, G, é dada pelo inverso desta resistência de isolamento.

---

<sup>7</sup> O autor parte da seguinte citação:  
Távora, Francisco. "Linhas de Transmissão de Energia Eléctrica."

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} \quad [S] \quad (3.3-6)$$

Pelo que, a energia perdida, em função da condutância, é dada por:

$$p = IV = GV^2 \quad [W] \quad (3.3-7)$$

Assim, o cálculo da condutância faz-se em função das perdas por quilómetro de fase e da tensão nominal. E, partindo da equação anterior, facilmente se deduz:

$$G_k = \frac{p}{V^2} \quad [S/km] \quad (3.3-8)$$

O valor da condutância varia muito de acordo com a humidade da atmosfera envolvente. Numa linha aérea bem isolada e com ambiente seco toma valores praticamente nulos. Na prática, o valor de G não é facilmente obtido como o valor da tensão e o valor da capacidade, dependendo do tipo de isolamento, do número de isoladores na cadeia, do estado da superfície dos condutores, entre outros. (Checa, 1988)

### 3.3.3. Características Eléctricas

As características eléctricas da linha, por unidade de comprimento, são deduzidas a partir das constantes físicas supracitadas. De seguida, é introduzido o cálculo de cada uma destas características.

#### 3.3.3.1. Reactância

A reactância de auto-indução, por unidade de comprimento, é definida pela seguinte expressão:

$$X_k = \omega L = 2\pi f \times L_k \quad [\Omega/km] \quad (3.3-9)$$

Onde:

$L_k$  - Coeficiente de auto-indução [H/km]

$\omega$  - Frequência angular da corrente [rad/s]

$f$  - Frequência da rede [Hz]



### 3.3.3.2. Susceptância

A susceptância, por unidade de comprimento, é calculada do seguinte modo, fazendo uso da notação descrita anteriormente:

$$B_k = \omega C = 2\pi f \times C \text{ } [\Omega/km] \quad (3.3-10)$$

### 3.3.3.3. Impedância

A impedância é então o resultado da soma vectorial da resistência linear com a reactância linear, sendo dada por:

$$\bar{Z}_k = R_k + jX_k \text{ } [\Omega/km] \quad (3.3-11)$$

Cujo módulo e argumento são, respectivamente:

$$|Z_k| = \sqrt{R_k^2 + jX_k^2} \text{ } [\Omega/km] \quad (3.3-12)$$

$$\beta_k = \arctan\left(\frac{X_k}{R_k}\right) \quad (3.3-13)$$

### 3.3.3.4. Admitância

A admitância representa o inverso da impedância transversal, medida em Siemens. É, desta forma, um valor complexo cuja parte real equivale ao valor da condutância e a susceptância representa a sua parte imaginária.

$$\bar{Y}_k = G_k + jB_k \text{ } [\Omega/km] \quad (3.3-14)$$

Cujo módulo e argumento são, respectivamente:

$$|Y_k| = \sqrt{G_k^2 + jB_k^2} \text{ } [\Omega/km] \quad (3.3-15)$$

$$\beta_{Yk} = \arctan\left(\frac{B_k}{G_k}\right) \quad (3.3-16)$$

### 3.3.4. Corrente de Serviço

A corrente de serviço permite retirar conclusões sobre as perdas de energia e sobre as quedas de tensão, sendo também importante para a determinação da secção transversal do condutor. Portanto, o seu cálculo é essencial:

$$I_s = \frac{P_n}{\sqrt{3} \times U \times \cos(\varphi)} \quad [A] \quad (3.3-17)$$

Onde  $P_n$  é a potência nominal de transporte, em kW,  $U$  é a tensão composta da linha, em kV, e  $\cos(\varphi)$  é o factor de potência da linha.

### 3.3.5. Perdas de Energia

As perdas de energia devem-se, sobretudo, às perdas por efeito de Joule, i.e., às perdas de energia sob a forma de calor que resultam da passagem da corrente nas linhas (pois estas têm carácter resistivo). Esta energia dissipada calcula-se do seguinte modo:

$$P_{perdas} = 3 \times R \times I_s^2 \quad [kW] \quad (3.3-18)$$

Para que se possam tirar conclusões sobre a quantidade de potência dissipada, esta deverá ser comparada à potência que se está a transmitir. Assim, o valor relativo da potência de perdas em relação à potência nominal, obtém-se:

$$P(\%) = \frac{P_{perdas}}{P_n} \times 100 \quad (3.3-19)$$

### 3.3.6. Quedas de Tensão

Como as linhas aéreas até 30kV se consideram curtas e a operar em tensões moderadas, é correcto adoptar algumas simplificações no cálculo das quedas de tensão:

- Admitância da linha considera-se nula;
- Admite-se que a tensão no início da linha corresponde à tensão nominal.
- Assume-se que a queda de tensão na linha depende, unicamente, da componente activa da corrente que atravessa a resistência e pela

componente reactiva da corrente que atravessa a reactância.  
(Madureira, 2009)

A queda de tensão fica então:

$$\Delta U = \sqrt{3} \times I_s (R \times \cos(\varphi) + X \times \sin(\varphi)) \quad [V] \quad (3.3-20)$$

### 3.3.7. Intensidade máxima admissível

“No cálculo da intensidade máxima da corrente de curto-circuito admite-se, por um lado, que os efeitos ocorrem em pontos da rede afastados das centrais geradoras e, por outro lado, que a duração do curto-circuito é baixa. A consideração destas hipóteses permite tomar o valor eficaz da corrente permanente de curto-circuito em vez do valor eficaz médio da corrente total de curto-circuito no cálculo da intensidade máxima admissível. Esta simplificação é inteiramente admissível tratando-se de curto-circuitos em linhas de distribuição de 30 kV equipadas com condutores de secções não muito elevadas.” (Madureira, 2009)

Considera-se ainda que as variações do calor específico e da massa do condutor não variam com a temperatura. Tendo isto, a intensidade máxima da corrente de curto-circuito é calculada através:

$$I_{max} = \frac{\sigma}{k_1 \times k_2 \times \sqrt{t}} \quad [kA] \quad (3.3-21)$$

Onde  $t$  representa o tempo, em segundos,  $k_1$  é uma constante do material condutor e  $k_2$  é um coeficiente que depende da variação da temperatura no respectivo condutor,  $\sigma$  representa a secção condutora em  $mm^2$ . A tabela seguinte apresenta os valores que estas constantes tomam para cada tipo de material do condutor. (D.G.E., 1986)

**Tabela 3.3-1 - Valores das constantes para cada tipo de material de condutor:  $k_1$  e  $k_2$ .**

Material do condutor	$k_1$ [ $mm^2/kA$ ]	$k_2$ [ $mm^2/kA \cdot s^{1/2}$ ]	Temperatura final [ $^{\circ}C$ ]
Cobre	4,419	1,685	170
Alumino-aço	6,902	1,732	160
Ligas de alumínio	6,902	1,809	160





## Capítulo 4

# 4. AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO

### *4.1. Generalidades*

Neste capítulo é apresentada a plataforma de cálculo, desenvolvida pelo autor, que contempla o cálculo mecânico de linhas eléctricas de Alta Tensão até 30kV.

Seguidamente é realizado um caso de estudo de um projecto de uma linha aérea de 2ª classe cujo dimensionamento resulta da utilização da referida ferramenta de cálculo.

## ***4.2. Desenvolvimento da Plataforma de Cálculo***

### ***4.2.1. Motivação***

Como já foi referido, o projecto de linhas aéreas de alta tensão assenta num conjunto de rotinas interdependentes, o que impele a inevitabilidade de automatizar este processo.

Existem diversas ferramentas privadas, nomeadamente na EDP Distribuição, que contemplam este cálculo, mas não estão disponíveis para o projectista comum. Por isto, foi desenvolvida uma plataforma de cálculo recorrendo ao *software MS EXCEL* que possibilita a realização de operações menos sensíveis, isto é, os cálculos e dimensionamentos que simplificam o projecto sem deteriorar o espírito crítico próprio do projectista.

Esta plataforma de cálculo tem um carácter iminentemente prático, isto é, os cálculos previstos pela plataforma de cálculo são referentes aos parâmetros que têm interesse para o projectista. Desta forma, tal como já se referiu anteriormente, o cálculo eléctrico é realizado pelo operador da rede de distribuição e, por essa razão, não está previsto no automatismo desenvolvido.

### ***4.2.2. Metodologias***

Os cálculos previstos pela plataforma de cálculo permitem aferir da estabilidade do apoio na linha e respeitam o que foi apresentado anteriormente neste documento.

Para a construção desta plataforma, foi definido o seguinte procedimento:

- Incorporação dos condutores e apoios normalizados pela EDP Distribuição e respectivas características técnicas;
- Incorporação de armações e medição de grandezas relevantes, segundo os desenhos fornecidos pelas normas da EDP Distribuição.
- Cálculo dos esforços sobre os apoios e armações, segundo cada eixo ortogonal, de acordo com a regulamentação em vigor (RSLEAT);
- Montagem de uma folha de rosto com apresentação dos dados mais relevantes com interacção dinâmica com o utilizador;

- Programação em VBA de *features* que melhorem a respectiva interface;
- Cálculo da tabela de regulação dos condutores (tensão e flecha) para as diferentes temperaturas, respeitando a equação da mudança de estado;
- Escolha de um método de convergência que permita o cálculo mencionado no ponto anterior;
- Desenho de esquema representativo do apoio e das linhas que a ele se ligam e os respectivos ângulos;
- Selecção automática do apoio de acordo com os esforços previamente calculados.

#### 4.2.3. Principais cálculos previstos na plataforma

A plataforma de cálculo desenvolvida foi analisada, primeiramente, como um sistema no qual são introduzidos valores (*inputs*) e do qual se retiram determinados parâmetros (*outputs*). Na tabela seguinte estruturou-se, sumariamente, os principais valores de entrada e de saída, envolvidos no funcionamento da plataforma.

Input	<b>Tipo de condutor</b> (ligas de alumínio, alumino-aço)
	<b>Secção</b>
	<b>Tracção máxima aplicada ao condutor</b> (Deverá ser inferior a 40% da tensão de ruptura, de acordo com o estipulado no art. 24.º)
	<b>Altura do apoio</b>
	<b>Cota do terreno</b> (Acção do gelo - Cálculo segundo o art.º 65 do RSLEAT))

	<p><b>Caracterização quanto à poluição</b></p> <p>(Cálculo segundo o art.º 50 do RSLEAT e Guia de Coordenação de Isolamento da EDP Distribuição)</p>
	<p><b>Tipo de armação</b></p> <p>GAL, GAN, TAL, TAN, PAL, PRF, entre outras.</p> <p>Ver subcapítulo 2.3.3</p>
	<p><b>Comprimento dos vãos adjacentes</b></p>
	<p><b>Comprimento de cada vão que compreende o cantão do apoio em estudo</b></p>
	<p><b>Comprimento de cada vão que compreende o cantão do apoio em estudo</b></p>
	<p><b>Vão máximo permitido pela armação.</b></p> <p>Confirmação de que o vão projectado não excede o vão máximo permitido pela travessa, que depende da sua distância de garantia.</p> <p>(Obedece ao disposto no art. 31.º)</p>
	<p><b>Resultante das tensões dos condutores</b></p> <p>Tracção exercida pela linha principal e pelas derivadas.</p>
	<p><b>Resultante da pressão dinâmica do vento</b></p>
	<p><b>Esforço total a que o apoio está sujeito</b></p> <p>Cálculo segundo os arts. 56.º a 61.º do RSLEAT dependendo se o apoio é de alinhamento, de ângulo, reforço, fim de linha e de derivação, tal como se explica no subcapítulo 3.2.12.</p>
	<p><b>Vão equivalente</b></p>



	<b>Vão crítico</b>
	<b>Tensões de regulação</b>  São obtidas recorrendo à equação de estados.
	<b>Flecha dos condutores</b>  Calculada com base na tensão no estado de Verão, que resulta da aplicação da equação (3.2-5).

#### ***4.2.4. Apresentação da Plataforma***

A plataforma está dividida em várias secções. A folha “Main” é a principal e, nesta folha, o projectista insere os *inputs* – condutores, comprimento dos vãos, cota do terreno, ângulo, entre outros – e recebe as principais informações – os esforços exercidos sobre cada eixo para cada hipótese, o apoio sugerido, os isoladores a utilizar, entre outros.

Função do apoio

Normal

30

[kV]

Função do apoio

Apoio de Alinhamento

Vão anterior		Vão posterior		Derivada 1	
AL-ACO 160		AL-ACO 160		Inexistente	
Comprimento do vão (L)	250	250		[m]	
tensão máxima (tmax)	9	9		[daN/mm2]	
Secção (S)	157,92	157,92		[mm2]	
Diâmetro (d)	16,32	16,32		[mm]	
Coef. Forma (c)	1	1		[daN/mm2]	
Coef. Redução (ct)	0,6	0,6		[daN/mm2]	
Modulo de Elasticidade (E)	6080	6080		[daN/mm2]	
Coef. Dilatação Linear (α2)	2,30E-05	2,30E-05		[daN/mm2]	
Tensão de ruptura estipulada	30,24	30,24		[daN/mm2]	
Peso unitário (w0)	0,53652	0,53652		[daN/m]	
Peso da manga de gelo (wg)	0,74418	0,74418		[daN/m]	
Cota do terreno	500	500		[m]	
Pressão dinâmica vento red. (q1)	30	30		[daN/m2]	
Pressão dinâmica vento max. (q2)	75	75		[daN/m2]	
Força do vento Primavera (Fvp)	0,720446	0,720446		[daN/m]	
Força do vento Inverno (Fvi)	0,288179	0,288179		[daN/m]	
Coef. Sobrecarga Inverno (m1)	1,135122	1,135122		[daN/m]	
Coef. Sobrecarga Primavera (m2)	1,674257	1,674257		[daN/m]	
Estado mais desfavorável	Primavera	Primavera		[daN/m]	
Vão crítico (Lcr)	226,16	226,16		[m]	
Vão equivalente	300,00	300,00		[m]	
Angulo (β)	0	0		[grados]	

Armiação		GAN
Distância de garantia	1,922	[m]
Distância mínima entre cond.	1,330	[m]
Vão max. permitido pela armiação	428,35	[m]

Nivel de Poluição	Médio
Isoladores	3 x U70BS
Linha de fuga	20 mm/kV

Força do vento

Fv = 540,33

[daN]

Tracção (x)

Tx = 0,00

[daN]

Tracção (y)

Ty = 0,00

[daN]

Totais

Fy = 540,33

Fx = 0,00

[daN]

[daN]

Hipótese 2: (é desnecessária a verificação desta hipótese para apoios de betão)

Força do vento

Fv = 0,00

[daN]

Tracção (x)

Tx = 0,00

[daN]

Tracção (y)

Ty = 0,00

[daN]

Totais

Fy = 0,00

Fx = 0,00

[daN]

[daN]

Hipótese 3: (Acção excepcional não existente)

Torção (ruptura de condutor)

Desenhar

Altura do apoio

18

[m]

Orientação

A

[grados]

Apoio sugerido

18-MP00-600-320

LD1

LD2

Figura 2.3.1-1 - Layout da folha "Main", a folha central desta ferramenta de cálculo.

Nesta folha, é possível seleccionar a função do apoio na linha: normal, reforço ou fim de linha. A plataforma de cálculo permite a existência de diferentes condutores e diferentes tracções nos vãos adjacentes. Considerou-se importante fazer esta distinção por existirem diversas situações em que esta diferença entre os dois vãos é patente: utilização de condutor com maior resistência mecânica que suporte uma maior tracção para vencer um vão maior ou, com maior frequência, no projecto de linhas, com menor secção, que derivam de linhas existentes.

Foi feita a incorporação no cálculo de até duas linhas derivadas e está prevista a presença de gelo para os casos em que o valor introduzido para a cota do terreno é superior a 700 metros.

Todas as informações técnicas sobre os condutores e, também, o cálculo de parâmetros relacionados com estes para cada vão – a força do vento e os coeficientes de sobrecarga para a Primavera e Inverno – estão presentes na folha “Cabos”.

Na folha “Estabilidade” são calculados os esforços sobre os apoios e sobre as armações de acordo com a função que têm na linha e em concordância com as recomendações para linhas eléctricas de alta tensão até 30kV.

Na secção “Apoios” reúnem-se as informações relativas aos apoios normalizados pela EDP Distribuição nomeadamente os esforços que os apoios suportam segundo cada eixo para uma pressão dinâmica do vento de 750 Pa. Nesta folha é ainda averiguada a viabilidade de utilização do apoio, segundo a orientação A e B, para os esforços calculados previamente.

É na folha “Armações” que estão registadas as distâncias de cada condutor ao topo do poste e a distância de garantia correspondente para cada travessa. Nesta folha também está calculado o coeficiente de redução pois este valor varia de acordo com a distância dos condutores ao topo do poste.

Na secção “Regulação” estão as tabelas com as tensões e flechas de montagem para uma gama de temperaturas de -5°C a 50°C. A solução da equação de estados, para o cálculo das tensões de montagem, foi determinada recorrendo ao método Newton-Raphson para garantir rápida convergência.



Para além da organização mencionada, existe alguma programação em linguagem *Visual Basic* a correr no *background* da plataforma. Esta programação é responsável pela realização de operações, como quando se selecciona uma opção em qualquer lista, pelo desenho do diagrama do apoio, permite o cálculo do vão equivalente de forma expedita, e é, também, responsável por uma série de opções gráficas que melhoram a interface com o utilizador.

Todos os cálculos previstos pelo programa foram validados através da comparação dos valores obtidos, para as mesmas condições, com o livro (Checa, 1988) e com as recomendações para linhas aéreas de alta tensão até 30kV da Direcção Geral de Energia(D.G.E., 1986).

### **4.3. Caso de Estudo**

O projecto realizado consiste numa linha com tensão nominal de 30kV e com condutores de alumino-aço de 160mm<sup>2</sup>. A linha estende-se ao longo de cerca de 6 km, subindo uma serra que ultrapassa a cota de 700 metros. Por esta razão, existem zonas onde é necessário considerar a existência de manga de gelo para o Inverno. Esta linha foi escolhida por abranger várias situações distintas, o que permite compará-las e destacar as diferenças entre elas.

O perfil utilizado para o caso de estudo foi alterado para que não seja reconhecido. Por este motivo, os nomes dos proprietários, as vias de comunicação e quaisquer locais mencionados são fictícios. Este perfil está representado no anexo II no seu estado final, isto é, já com os apoios e armações devidamente seleccionados.

Observando o perfil do terreno e a planta parcelar reconhece-se que o levantamento topográfico foi realizado com o cuidado de não interferir com determinados condicionalismos. Mais concretamente, o traçado escolhido evita a aproximação a uma charca e a travessia de um campo de jogos. Existe também a preocupação de manter o traçado o mais rectilíneo possível.

O projecto foi realizado de acordo com as práticas mencionadas ao longo do presente documento. Portanto, numa primeira fase, o perfil foi analisado com o propósito de identificar os condicionalismos existentes e as distâncias mínimas que devem ser garantidas a estes.

Apesar da precisão dos levantamentos topográficos, efectuados através de equipamentos com recurso a *GPS*, a escala de redução utilizada para representar a planta parcelar e o perfil, em linhas de média tensão, introduz erros consideráveis na medição e no desenho. Por outro lado, é importante prever situações em que se verifique que alguns dos obstáculos variem em dimensão ou posição geográfica (coberto vegetal e infra-estruturas).

Por estas razões, é natural que se projecte a linha de forma a exceder a distância ao solo e aos obstáculos imposta pelo regulamento. Na tabela seguinte, representam-se as distâncias impostas pelo regulamento e as distâncias que foram utilizadas no projecto.

Condicionalismo	Distância obtido pela aplicação do regulamento.	Distância utilizada no projecto.
	[m]	[m]
Solo	6.15	8 a 10
Árvores	2.5	4
Edifícios	4	5
Linhas aéreas (Energia e Telecomuni- cações)	2.15	4

Salienta-se que no, cruzamento com árvores, não deverá ser feito o decote das árvores com crescimento lento, salvo situações em que o custo técnico-económico se revele inoportuno.

Foi definida a tensão 9daN/mm<sup>2</sup> como o valor máximo de tracção a aplicar aos condutores, por respeitar o art.24.º do RSLEAT, i.e., representa menos de 40% da tensão de ruptura para este condutor. Esta tracção permitirá reduzir a flecha face a valores inferiores e diminuir ainda o esforço sobre os apoios que seria provocado com uma tensão superior.

Recorrendo à plataforma de cálculo, obtém-se o parâmetro da catenária correspondente ao estado de flecha máxima. Este parâmetro é dependente do cálculo da tracção dos condutores para o estado de Verão, feito através da equação da mudança de estados, que parte do estado atmosférico mais desfavorável.

No perfil são colocados os apoios cuja posição não pode ser alterada. De seguida, tendo por base o parâmetro da curva calculado, faz-se a distribuição dos restantes apoios. De forma a otimizar esta fase, deve ser considerada a armação mais adequada para cada apoio: a disposição dos condutores determina a altura a que se encontra o condutor mais baixo e o mais alto, que é determinante no cumprimento das distâncias mínimas exigidas às existências no perfil; condiciona também o vão máximo admissível devido à distância de garantia inerente a cada armação.

Nesta operação de distribuição dos apoios no perfil, é necessário prever os possíveis impedimentos/alterações que possam surgir na execução do projecto. Assim, os apoios foram colocados, sempre que possível, nas extremas das divisões dos terrenos sempre que possível ou junto a muros e vedações existentes. Procurou-se evitar a colocação de apoios em terrenos rochosos que dificultam a construção da fundação.

Nas zonas de gelo, as armações foram escolhidas, por forma a que não houvessem sobreposições de condutores no plano vertical, de modo a evitar que a queda de gelo de um condutor superior cause oscilações ou cargas adicionais no condutor inferior. Importa ainda referir que, nestas zonas, os vãos máximos permitidos pelas armações são diminuídos devido à menor tracção dos condutores no Verão, consequência directa da aplicação da equação de mudança de estado.

Tal como está previsto no regulamento, foram colocados apoios de reforço espaçados com distâncias inferiores a 2km. Na travessia do caminho de ferro foram utilizados dois apoios de reforço com amarração dos condutores para aumentar a segurança neste troço e garantir que os apoios conseguem resistir caso ocorra a ruptura de um condutor.

A escolha dos apoios a utilizar foi feita recorrendo à plataforma de cálculo. Para cada apoio é introduzido os vãos adjacentes, o ângulo entre eles, a tracção considerada e a função do apoio. Deve também ser introduzida a cota do terreno para averiguar quanto à possibilidade de existência de gelo no Inverno. Com isto, a plataforma calcula a totalidade dos esforços exercidos sobre o apoio e selecciona o apoio normalizado, para uma dada altura, que possua a capacidade necessária e suficiente para resistir a esses esforços.

No anexo III apresenta-se a tabela que, para cada apoio do perfil, contempla as principais características a saber para realizar o cálculo do apoio assim como os esforços resultantes e o respectivo apoio seleccionado.

Nas situações em que existem derivações, o diagrama presente na plataforma de cálculo é importante para compreender a forma como devem ser introduzidos os ângulos para que os cálculos a realizar sejam coerentes e conduzam a resultados correctos.

Colocaram-se dispositivos dissuasores de nidificação, nas situações de fixação dos condutores por amarração, para evitar a electrocussão das aves durante o processo de nidificação.

#### 4.3.1. Exemplo de utilização da plataforma

De forma a mostrar a potencialidade da ferramenta de cálculo faz-se uma demonstração da sua utilização para um apoio genérico deste perfil. Selecciona-se o apoio 7 por ser o caso de um apoio de ângulo em derivação.

São introduzidos os vãos adjacentes, a tensão máxima admissível, a cota do terreno, o vão fictício ou equivalente e o ângulo  $\beta$ . De seguida são introduzidos os dados relativos à linha derivada. Tem-se:

**Tabela 4.3-1 - Dados a introduzir na plataforma de cálculo para o apoio nº 7.**

	Linha Principal	Linha derivada
Condutor	Alumino-aço 160 mm <sup>2</sup>	Alumino-aço 160 mm <sup>2</sup>
Comprimento do vão	<u>Anterior:</u> 321,86 m <u>Posterior:</u> 180,23 m	50 m
Tensão máxima	9 daN/mm <sup>2</sup>	9 daN/mm <sup>2</sup>
Cota do terreno	500 m	500 m
Ângulo	33,95 grados	333,37 grados



Importa referir que, na leitura do ângulo de derivação no perfil, é necessário compreender que o apoio é colocado na bissectriz do ângulo e, por isso, é necessário ajustar o referencial para não incorrer em erros de introdução de dados.

Na figura seguinte é possível ver parte da folha “Main” onde são introduzidos os valores *supra* referidos.

Função do apoio: Normal  
 Tensão: 30 [kV]

	Vão anterior	Vão posterior	Derivada 1	Derivada 2
<b>condutor</b>	AL-AÇO 160	AL-AÇO 160	AL-AÇO 160	Inexistente
Comprimento do vão (L)	321,86	180,23	50	[m]
tensão máxima (tmax)	9	9	9	[daN/mm2]
Secção (S)	157,92	157,92	157,92	[mm2]
Diâmetro (d)	16,32	16,32	16,32	[mm]
Coef. Forma (c)	1	1	1	
Coef. Redução (α1)	0,6	0,6	0,6	
Modulo de Elasticidade (E)	6080	6080	6080	[daN/mm2]
Coef. Dilatação Linear (α2)	2,30E-05	2,30E-05	0,000023	[°C^-1]
Tensão de ruptura estipulada	30,24	30,24	30,24	[daN/mm2]
Peso unitário (w0)	0,53652	0,53652	0,53652	[daN/m]
Peso da manga de gelo (wg)	0,74418	0,74418	0,74418	[daN/m]
Cota do terreno	500			[m]
Pressão dinâmica vento red. (q1)	30			[daN/m2]
Pressão dinâmica vento max. (q2)	75			[daN/m2]
Força do vento Primavera (Fvp)	0,720446	0,720446	0,720446	[daN/m]
Força do vento Inverno (Fvi)	0,288179	0,288179	0,288179	[daN/m]
Coef. Sobrecarga Inverno (m1)	1,135122	1,135122	1,135122	
Coef. Sobrecarga Primavera (m2)	1,674257	1,674257	1,674257	
Estado mais desfavorável	Primavera			
Vão crítico (Lcr)	226,16	226,16	226,16	[m]
Vão equivalente	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Calcular VE</span> 270,85			[m]
Angulo (β)	33,95		333,37	[grados]
				[m]
<b>Armação</b>	PAN			
Distância de garantia	2,035			[m]
Distância mínima entre cond.	1,690	0,812		[m]
Vão max. permitido pela armação	460,42	461,11		[m]

Main
Regulação
Estabilidade
Cabos
Apoios
Armações
...
+
-
1

Figura 2.3.1-1 - Exemplo de introdução de dados na plataforma de cálculo.

Daqui resulta o seguinte resultado:

Função do apoio:

Apoio de Derivação (Ângulo)

Hipótese 1: Vento paralelo à bissetriz do ângulo da linha principal

Força do vento	Fv =	402,37	[daN]
	Fv' =	13,54	[daN]
Tracção (x)	Tx =	0,00	[daN]
	Tx' =	2134,05	[daN]
Tracção (y)	Ty =	4335,18	[daN]
	Ty' =	-3691,37	[daN]
Totais	Fy =	1059,71	[daN]
	Fx =	2134,05	[daN]

Hipótese 2: Vento perpendicular à bissetriz do ângulo da linha Principal

Força do vento	Fv =	140,23	[daN]
	Fv' =	40,50	[daN]
Tracção (x)	Tx =	0,00	[daN]
	Tx' =	2134,05	[daN]
Tracção (y)	Ty =	4335,18	[daN]
	Ty' =	-3691,37	[daN]
Totais	Fy =	643,81	[daN]
	Fx =	2314,77	[daN]

Hipótese 3: (Acção excepcional não existente)

Torção (ruptura de condutor)

Altura do apoio	18
Orientação	A
Apoio sugerido	18-MG10-7500-3400

Desenhar

Figura 2.3.1-2 -Dados devolvidos pela plataforma para o exemplo em estudo.

Na folha de cálculo surgem, discriminados, os esforços a que o apoio está sujeito segundo cada eixo ortogonal. Para cada hipótese são apresentados os totais segundo os principais eixos.

O diagrama permite confirmar a correcta inserção dos ângulos para cada linha.

Por fim, é possível constatar que o apoio correcto a utilizar será o apoio 18MG10-7500-3400 segundo a orientação A.



## Capítulo 5

# 5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

### 5.1. Conclusões

Devido à sua natureza, as linhas aéreas interagem com o ambiente que as envolve, o que implica a existência de uma harmonia para que estas linhas causem o menor impacto possível. Para isto, existem várias entidades que se pronunciam no sentido de melhorar as condições em que são estabelecidas as linhas.

Um factor que condiciona todo o projecto é o levantamento topográfico. É importante acompanhar este processo para garantir que se reúnem as condições mais oportunas, isto é, que são evitadas situações que possam dificultar ou prejudicar o estabelecimento da linha. Concretamente, devem ser antevistos e mitigados os possíveis incómodos que possam ser causados aos proprietários dos terrenos atravessados pela linha.

Verifica-se que, do ponto de vista do projectista, o cálculo mecânico assume uma importância muito maior por se verificar que o cálculo eléctrico é calculado, maioritariamente, pelo operador da rede de distribuição. Desta forma, o cálculo

mecânico prende-se com a decisão técnico-económica mais favorável que permita elevar os condutores do solo, cumprindo as distâncias mínimas regulamentares, com estabilidade mecânica de todos os elementos da linha mesmo nas condições atmosféricas mais adversas.

A plataforma de cálculo agiliza o dimensionamento dos apoios com maior rapidez comparativamente ao cálculo analítico, contudo, é importante que se compreendam os resultados obtidos e que se mantenha uma postura crítica na sua análise.

O projecto foi escolhido por abranger várias situações distintas e, por isso, foi possível aplicar a plataforma de cálculo a um caso concreto e verificar as variações nos parâmetros que derivam dos conceitos que foram inicialmente expostos.

## ***5.2.Trabalho Futuro***

Propõe-se a incorporação, no cálculo mecânico, da influência exercida pela sinalização aeronáutica e avifauna. Para a sinalização avifauna, apesar de serem estruturas leves e com pouca área batida pelo vento, na presença de gelo podem-se revelar mais perturbadoras por permitirem o acumular de massas de gelo consideráveis, especialmente as espirais. No caso da sinalização aeronáutica, a principal sobrecarga poderá ser originada pelo vento pois esta sinalização (diurna) consiste em estruturas com uma secção batida pelo vento considerável.

A automatização do processo ou de parte do processo de distribuição de apoios em ambiente *AutoCAD*. Apesar de ambiciosa, esta ferramenta permitiria otimizar o número de apoios utilizados através da utilização das catenárias, atendendo às existências e desvios na sobrelevação do perfil.

Aplicação de algoritmos de optimização que permitam encontrar as soluções técnico-económicas mais adequadas, isto é, as soluções que permitam minimizar os custos totais associados às infra-estruturas escolhidas, respeitando as normas de segurança em vigor.

Actualmente, a norma europeia EN50341-1 não é considerada no projecto de linhas, contudo propõe-se a integração dos padrões desta norma numa ferramenta de cálculo automatizado para a poder comparar com a regulamentação em vigor. Como se pressupõe uma transição futura para esta norma, esta ferramenta de cálculo terá, ainda, aplicabilidade prática no cálculo e dimensionamento de linhas eléctricas de média tensão.



## Bibliografia

- Checa, L. M. (1988). *Lineas de transporte de energia*. S.A MARCOMBO. Retrieved from [https://books.google.es/books/about/L%C3%ADneas\\_de\\_transporte\\_de\\_energ%C3%ADa.html?hl=ES&id=J4qKMYB6wC4C&pgis=1](https://books.google.es/books/about/L%C3%ADneas_de_transporte_de_energ%C3%ADa.html?hl=ES&id=J4qKMYB6wC4C&pgis=1)
- Cruz, P. M. F. (2010). *LINHA MT - Aspectos construtivos , Projecto e Manutenção*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cunha, R. F. S. M. (2008). *Análise de solução “Condutores Especiais” nos “uprating” de linhas aéreas de Muito Alta Tensão*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- D.G.E. (1986). *Recomendações para linhas aéreas de alta tensão, até 30kV (M.T.)*. Direcção Geral de Energia.
- D.S.E.E. (1993). Edição DGE do Regulamento de Segurança de linhas electricas de alta tensão. Direcção de Serviços de Energia Eléctrica.
- Decreto Regulamentar 1/92 de 18 de Fevereiro da Direcção-Geral de Energia, Pub. L. No. Diário da República n.º 41/1992, Série I-B (1992). Retrieved from [www.dre.pt](http://www.dre.pt)
- EDP. (2005). Material para linhas aéreas- Armações de aço para postes de betão de MT- Características e ensaios. Retrieved from <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/profissionais/Lists/EDPDocumentos/Normativos/Attachments/339/DMA-C67-605N.pdf>
- EDP Distribuição. (2005a). Material para linhas aéreas - Bolas de balizagem diurna de condutores e de cabos de guarda.
- EDP Distribuição. (2005b). Material para linhas aéreas - luzes de obstáculos de baixa intensidade para balizagem nocturna de apoios(DMA-C66-916/N).
- EDP Distribuição. (2010). Guia técnico de terras - DRE-C11-040/N.
- EDP Distribuição. (2011). Guia de Boas Práticas para a Integração Paisagística, 2.
- EDP Distribuição. (2013). Dispositivos para a protecção de avifauna.
- Ferreira, N. J. da S. (2010). *Flecha e Tensão de Montagem nas Linhas Aéreas com Cadeias de Isoladores em Suspensão*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Galvan, J. L. T. (1997). *Transporte de la energia electrica*. (U. P. DE COMILLAS, Ed.). Madrid: UPCO.

- Galvão, C. (2010). *Redes eléctricas de média e baixa tensão*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Retrieved from [http://paginas.fe.up.pt/~ee04031/Dissertacao/Redes electricas de MT e BT\\_Aspectos de projecto licenciamento e exploracao em contexto operacional.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~ee04031/Dissertacao/Redes electricas de MT e BT_Aspectos de projecto licenciamento e exploracao em contexto operacional.pdf)
- Gonçalves, F. (2011). *Projecto de Execução de Linhas de Média Tensão*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Retrieved from [http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/teses/Tese\\_Mes t\\_Filipe-Gon%C3%A7alves.pdf](http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/teses/Tese_Mes t_Filipe-Gon%C3%A7alves.pdf)
- Gonçalves, N. A. L. V. (2004). *Projecto de Linha de Média Tensão, Rede de Baixa Tensão, Posto de Transformação e Iluminação Pública*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Grigsby, L. L. (2006). *ELECTRIC POWER GENERATION , TRANSMISSION , and DISTRIBUTION*. (L. L. Grigsby, Ed.). CRC Press.
- Labegalini, P. R., Labegalini, J. A., Fuchs, R. D., & Almeida, M. T. D. E. (1992). *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. (E. Blucher, Ed.) (2nd ed.). Blucher, Edgard.
- Leite, H. (2008). *Elaboração de Projectos de Linhas Aéreas*.
- Madureira, O. F. das N. (2009). *Projecto e construção da linha aérea em média tensão de interligação do parque eólico e a subestação de Pinhal Novo*. Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão. Retrieved from <http://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/2046>
- Metha, V., & Metha, R. (2005). *Principles of Power System: Including Generation, Transmission, Distribution, Switchgear and Protection: for BE/B. Tech., AMIE and Other Engineering Examinations*. S. Chand. Retrieved from [https://www.google.com/books?hl=pt-PT&lr=&id=If\\_hxYcDnAUC&oi=fnd&pg=PR2&dq=Principles+of+Power+System+\(By+V.K.+Mehta+%26+Rohit+Mehta\)&ots=B2Tljlhbdr&sig=gzUrpN4OLS\\_tf8Y93cJLtC6-Ync](https://www.google.com/books?hl=pt-PT&lr=&id=If_hxYcDnAUC&oi=fnd&pg=PR2&dq=Principles+of+Power+System+(By+V.K.+Mehta+%26+Rohit+Mehta)&ots=B2Tljlhbdr&sig=gzUrpN4OLS_tf8Y93cJLtC6-Ync)
- Pedreira, H. M. D. (2013). *Linhas Eléctricas Aéreas : Estudo do Movimento das Cadeias de Isoladores em Suspensão e Determinação dos Limites Técnicos para a sua Aplicação*. FEUP.
- Ramires, J. da S. (2008). *Projecto de linha de alta tensão – Estudo do comportamento eléctrico*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rocha, L. F. S. (2014). *Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão – Estudo sobre a utilização de Cabo de Guarda*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Sequeira, N. (2009). *Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão conforme a norma EN50341-1. Relatório de Projecto, Versão Provisória, FEUP*. Retrieved from [http://paginas.fe.up.pt/~ee02179/index\\_files/relatorio\\_de\\_projecto\\_provisorio.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~ee02179/index_files/relatorio_de_projecto_provisorio.pdf)



- Silva, V. M. Q. (2014). *Automatização Do Projeto De Linhas Eléctricas: Criação De Modelo Matemático Para Minimização De Custos*. FEUP.
- SPEA, & ANCN, Q. (2005). *Estudo sobre o Impacto das Linhas Eléctricas de Média e Alta Tensão na Avifauna em Portugal*.

## **Anexos**

### ***Anexo I – Memória Descritiva e Justificativa***

## **MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA**

### **INSTALAÇÃO PROJECTADA:**

- Linha mista a 30kV Nº 5617L30546 para o PT CAP 0654C FCTUNL

### **1. TROÇO AÉREO**

**ORIGEM:** Apoio nº 6A da linha a 30kV Nº 5617L300012 para o PT CAP 0018D JARDIM – **Proc.º 811/5617/213**

**OBJECTIVO:** Ligação à rede do PT CAP 0654C FCTUNL para permitir a entrega da energia produzida.

1.2 **LOCALIZAÇÃO:** Freguesia(s): Monte da Caparica  
Concelho(s): Almada

1.3.1 **TRACADO:**  
Planta Des. nº: 123-456-789-987; Perfil –Des. nº: 12.1234.56;

1.3.1 **CARACTERÍSTICAS:** Comprimento Total: 5820,69m (5763,09 m Aéreo + 57,60 m Subterrâneo); Neutro da Rede: à terra;

1.3.2 **Condutores:** Material: Alumino-aço; Secção: 160 mm<sup>2</sup>; Tensão máxima: 9 daN/mm<sup>2</sup>;  
Isoladores de Cadeia, tipo: U100BLP e U70BS;

1.3.2 **Armações:** Normalizadas, dos tipos indicados no perfil

1.3.4 **Apoios:** De betão, com as características indicadas no perfil.  
Outros: \_\_\_\_\_  
Com maciços: Todos.

1.4 **TRAVESSIAS E CRUZAMENTOS:** (indicar os nºs dos apoios adjacentes da linha de AT):

Estradas Nacionais: Entre apoio 2 e 3;  
Estradas Municipais: Entre apoio 20 e 21;  
Caminho de Ferro: Entre apoio 16 e 17;  
Linhas de Telecomunicações: Entre os apoios: 1 e 2; 2 e 3; 3 e 4; 5 e 6; 6 e 7; 9 e 10; 12 e 13; 13 e 14; 15 e 16; 19 e 20;  
Linha de AT : Entre o apoio 4 e 5;  
Linha de MT:  
Linha de BT: Entre os apoios: 5 e 6; 8 e 9;  
Outros: \_\_\_\_\_

1.5 **CÁLCULOS:** Segundo o projecto-tipo de linhas aéreas até 30KV

## **INDICAÇÕES COMPLEMENTARES:**

---

Em tudo omissos serão observadas as Normas e Regras de Segurança em vigor.

## **2. TROÇO SUBTERRÂNEO**

### **2.1 TROÇO SUBTERRÂNEO**

ÍNICIO: Cella nº 5 do barramento de média tensão da SE DEE.

FIM: Apoio nº 1 da presente Linha de MT (troço aéreo)

COMPRIMENTO: 32,75 metros (comprimento total do cabo)

CONDUTOR: 3 cabos monopolares de alumínio do tipo LXHIOZ1, 30 KV de 120 mm<sup>2</sup> de Secção

### **2.1 TROÇO SUBTERRÂNEO**

ÍNICIO: Apoio nº 24 da presente Linha de MT (troço aéreo)

FIM: PT CAP 0654C-FCTUNL

COMPRIMENTO: 24,64 metros (comprimento total do cabo)

CONDUTOR: 3 cabos monopolares de alumínio do tipo LXHIOZ1, 30 KV de 120 mm<sup>2</sup> de Secção

## **CONSIDERAÇÕES SOBRE A MONTAGEM**

Os cabos serão instalados em vala apropriada de largura suficiente a permitir uma fácil execução dos trabalhos.

O fundo da vala será coberto com uma camada de areia fina de cerca de 10 cm de espessura, sobre a qual assentarão os cabos, que serão cobertos por uma camada do mesmo material e de igual espessura.

Com vista a proteger os cabos contra as acções mecânicas bem como para a sua conveniente sinalização será instalada uma fiada de tijolos dispostos transversalmente, sobre a camada superior de areia fina.

A profundidade mínima de enterramento dos cabos será de 1,0m.

O traçado dos cabos é o que se fornece nos desenhos em anexo, **Des. nº 12.1234.56**

Em cada extremidade de cabo no apoio nº 24 e no PT CAP 0654C-FCTUNL, será montada uma caixa terminal exterior e interior monopolar de 30 kV respectivamente

## **TRAVERSAS E CRUZAMENTOS:**

---

**O AUTOR DO PROJECTO**

**O TÉCNICO RESPONSÁVEL**

( Rafael Cardoso )

( \_\_\_\_\_ )

## *Anexo II – Perfil*

*Anexo III -Tabela com apoios escolhidos para o perfil*

Número do Apoio	Classificação do Apoio	Vão anterior [m]	Vão posterior [m]	Ângulo [grados]	Armação	Tipo de Fixação (A-Amarração S-Suspensão)	Esforços segundo o eixo y [daN]	Esforços segundo o eixo x [daN]	Apoio Escolhido
1	Fim de linha	-----	65,13	-----	HFL	A	93,85	4263,84	16-MG10-7500-3400
2	Apoio de ângulo	65,13	270,34	24,89	GAN	A	2673,73	0	20-MM06-2750-1300
3	Apoio de alinhamento	270,34	216,46	0	GAL	S	701,43	0	20-MP01-800-420
4	Apoio de alinhamento	216,46	183,99	0	GAL	S	577,01	0	20-MP00-600-320
5	Apoio de alinhamento	183,99	293,01	0	GAL	S	687,31	0	18-MP01-800-420
6	Apoio de alinhamento	293,01	321,86	0	GAL	S	885,96	0	22-MP02-1000-520
7	Apoio de derivação em ângulo	321,86	180,23	33,95	GAN	A	1059,71	2134,05	18-MG10-7500-3400
8	Apoio de alinhamento	180,23	205,41	0	GAL	S	555,41	0	20-MP00-600-320

9	Apoio de reforço em alinhamento	205,41	387,97	0	PRF	A	855	0	2x 18-MP04-1600-740
10	Apoio de alinhamento	387,97	144,84	0	GAL	S	767,72	0	22-MP01-800-420
11	Apoio de ângulo	144,84	424,41	36,07	GAN	A	3934,34	0	22-MM08-4000-1800
12	Apoio de alinhamento	424,41	298,57	0	GAL	S	1041,74	0	26-MP02-1200-560
13	Apoio de ângulo	298,57	211,27	6,19	GAN	A	1285,45	0	18-MP04-1600-740
14	Apoio de ângulo	211,27	340,47	4,6	GAN	A	1204,66	0	20-MM04-2250-1000
15	Apoio de alinhamento	340,47	175,03	0	GAL	S	742,78	0	22-MP01-800-420
16	Apoio de reforço em alinhamento	175,03	398,65	0	PRF	A	826,61	0	2x 22-MM04-2250-1000
17	Apoio de reforço em alinhamento o	398,65	96,54	0	PRF	A	535,15	0	2x 18-MM08-4000-1800
18	Apoio de alinhamento	96,54	365,60	0	PAL	S	665,89	0	2x 18-MP00-400-220
19	Apoio de alinhamento	365,60	332,17	0	PAL	S	1005,41	0	2x 16-MP00-600-320



20	Apoio de alinhamento	332,17	266,90	0	PAL	S	863,20	0	2x 18-MP00-600-320
21	Apoio de derivação em ângulo	266,90	334,52	14,63	PAN	A	3108,6	879,4	2x 18-MM10-5000-2350
22	Apoio de alinhamento	334,52	142,82	0	PAL	S	687,80	0	2x 18-MP00-400-220
23	Apoio de alinhamento	142,82	106,90	0	HRFSC3	A	359,82	0	16-MP00-400-220
24	Fim de linha	106,90	-----	0	HFL	A	154,03	4263,84	16-MG10-7500-3400

*Anexo IV -Tabela com tensões de montagem*

Número do Vão	Comprimento [m]	Vão equivalente [m]	Temperatura [° C]								
			0	5	10	15	20	25	30	35	40
1	65,13	65,13	8,28	7,62	6,96	6,32	5,69	5,09	4,52	3,99	3,51
2	270,34	274,49	7,50	7,17	6,85	6,56	6,30	6,05	5,82	5,61	5,41
3	216,46	274,49	8,33	7,87	7,44	7,03	6,65	6,31	5,99	5,69	5,42
4	183,99	274,49	8,92	8,38	7,87	7,39	6,93	6,51	6,12	5,76	5,43
5	293,01	274,49	7,22	6,93	6,66	6,41	6,18	5,97	5,77	5,58	5,41
6	321,86	274,49	6,93	6,69	6,46	6,26	6,06	5,88	5,71	5,55	5,40
7	180,23	193,71	8,20	7,69	7,22	6,77	6,35	5,96	5,61	5,29	5,00
8	205,41	193,71	8,18	7,71	7,27	6,86	6,48	6,13	5,80	5,51	5,24
9	387,97	338,79	6,45	6,29	6,14	6,00	5,86	5,74	5,62	5,50	5,39
10	144,84	338,79	9,64	9,03	8,44	7,87	7,32	6,80	6,32	5,86	5,45
11	424,41	377,13	6,27	6,14	6,02	5,90	5,79	5,68	5,58	5,48	5,39
12	298,57	377,13	7,16	6,88	6,62	6,38	6,16	5,95	5,75	5,57	5,41
13	211,27	211,27	8,18	7,72	7,29	6,88	6,51	6,16	5,85	5,56	5,29
14	340,47	294,49	6,77	6,56	6,36	6,17	6,00	5,83	5,68	5,54	5,40
15	175,03	294,49	9,08	8,53	8,00	7,49	7,02	6,57	6,16	5,78	5,44
16	398,65	398,65	6,39	6,24	6,10	5,97	5,84	5,72	5,61	5,50	5,39
17	96,54	314,77	5,97	5,43	4,93	4,47	4,06	3,70	3,39	3,12	2,88
18	365,6	314,77	3,59	3,55	3,51	3,48	3,44	3,41	3,37	3,34	3,31
19	332,17	314,77	3,63	3,59	3,54	3,50	3,45	3,41	3,37	3,33	3,30
20	266,9	314,77	3,79	3,71	3,64	3,57	3,50	3,43	3,37	3,32	3,26
21	334,52	290,33	3,63	3,58	3,54	3,50	3,45	3,41	3,37	3,34	3,30
22	142,82	290,33	4,87	4,54	4,25	3,99	3,76	3,56	3,38	3,22	3,07
23	106,9	106,9	5,69	5,20	4,75	4,34	3,98	3,66	3,38	3,15	2,94